

El origen de los cráteres lunares

The origin of lunar craters

ALFRED WEGENER

Preliminares históricos y traducción castellana de CÁNDDIDO MANUEL GARCÍA CRUZ

INHIGEO (International Commission on the History of Geological Sciences). E-mail: candidomgc@gmail.com

Resumen Alfred Wegener (1880–1930), eminente meteorólogo, paleoclimatólogo, y padre del movi­lismo geológico, hizo también una gran contribución para dilucidar el origen de los cráteres lunares mediante una serie de experimentos a favor de la hipótesis del impacto. Tras el análisis de los preliminares históricos sobre estas ideas, desde Galileo Galilei (principios del siglo xvii) hasta Ralph B. Baldwin y Robert S. Dietz (mediados del siglo xx), se presenta la primera traducción en castellano de su obra *Die Entstehung der Mondkrater* (1921) en la que Wegener discute las hipótesis previas (burbuja, mareal y volcánica), describe sus experiencias de laboratorio, y analiza diversos aspectos geológicos de la superficie lunar en comparación con la de la Tierra, siendo partidario además de un origen común, por acreción, de ambos cuerpos planetarios.

Palabras clave: Alfred Wegener, hipótesis del impacto, Luna, origen de los cráteres.

Abstract *Alfred Wegener (1880–1930), an eminent meteorologist, paleoclimatologist, and the father of geological mobilism, also made a major contribution to the elucidation of the origin of lunar craters by means of a series of experiments in favour of the impact hypothesis. What follows are the historical preliminaries of these ideas, from Galileo Galilei (at the turn of the 17th century) to Ralph B. Baldwin and Robert S. Dietz (around the middle of the 20th century), and then we present the first translation into Spanish of his work Die Entstehung der Mondkrater (1921), in which Wegener discusses the previous views (bubble, tide and volcanic hypothesis), describes his laboratory experiments and analyses several geological aspects of the Moon surface compared to that of the Earth. Incidentally, he supported a common origin, by accretion, for both planetary bodies.*

Keywords: Alfred Wegener, impact hypothesis, Moon, origin of craters.

PRELIMINARES HISTÓRICOS

Como se puede comprobar con una simple observación de los planetas y satélites sólidos del Sistema Solar, la craterización por impacto ha sido sin duda uno de los fenómenos que más ha influido en la modelización de la superficie de la mayoría de estos cuerpos planetarios. Sin embargo, y a pesar de que desde hace varias décadas ya existía un cierto consenso sobre los impactos meteoríticos, hasta hace relativamente poco tiempo, este proceso no era considerado ni valorado de forma adecuada por la mayor parte de la comunidad geológica debido a una aplicación dogmática del Principio del Actualismo–Uniformitarismo. La carencia absoluta de testimonios históricos, y por lo tanto de experiencia al respecto, ha sido más que suficiente para que una gran parte de científicos negase la posibilidad de un impacto procedente del espacio exterior. La controversia generada para intentar explicar las es-

tructuras crateriformes se enmarcaba, por otro lado, en la aceptación acrítica del Principio de Parsimonia o Navaja de Ockham. De esta forma, aplicando la metodología de la hipótesis más simple, y ante la ausencia de analogías actuales que sirvieran para comparar determinados hechos del pasado y sus correspondientes causas, la ciencia prefería mirar hacia procesos geológicos internos, preferentemente la actividad volcánica, y desechar los impactos para explicar la craterización del Sistema Solar, a pesar de que algunos científicos consideraban que éste último proceso debería ser también tenido en cuenta. El debate, de naturaleza multidisciplinar, ha estado servido durante más de tres siglos, y en él han participado astrónomos, geólogos, físicos, paleontólogos, y geoquímicos, no sólo bajo aspectos teóricos y observacionales, sino también con fundamentos empíricos.

En los párrafos que siguen se hará una breve síntesis sobre la hipótesis del impacto, y se abordará

posteriormente la contribución de Alfred Lothar Wegener (1880–1930)¹.

A principios del siglo xvii, Galileo Galilei (1564–1642) llevó a cabo sus primeras observaciones de la superficie lunar, con la descripción de su relieve montañoso que aparece en *Sidereus Nuncius* (Galilei, 1610, pp. 41–56), con sus pequeños, abundantes y enigmáticos caracteres en forma de “manchas”, definidas como “depresiones” u “oquedades”, y que posteriormente se denominarían cráteres lunares. Las representaciones gráficas de Galileo fueron criticadas debido a su escasa calidad por Johannes Hevelius (1611–1687), quien publicaría una descripción de la Luna en su *Selenographia* (1647), poco después de la muerte del astrónomo italiano, en la que aparece por primera vez una nomenclatura sistemática de su topografía, revisada unos años más tarde por Giovanni Battista Riccioli (1598–1671) en su *Almagestum Novum* (1661), cuyas bases han perdurado hasta el presente. Desde entonces, numerosos científicos han intentado explicar el origen de los cráteres incluso de forma experimental. Uno de esos trabajos pioneros lo llevó a cabo el polifacético Robert Hooke (1635–1703), cuyo desarrollo y conclusiones están recogidos en su *Micrographia* (1665). A pesar de que esos cráteres experimentales eran muy similares a los observados en nuestro satélite, Hooke concluyó –una vez más, bajo el espectro del actualismo– que no era posible suponer una causa análoga a esa, porque sería difícil imaginar de dónde procederían los cuerpos impactantes; por eso defendió un origen basado en erupciones y burbujas de magma que se elevaban desde el interior en la Luna (Hooke, 1665, Observación lx, De la luna, pp. 594–602); sobre estas ideas volvería algunos años más tarde en sus conferencias y discursos sobre terremotos y fuegos subterráneos (Hooke, 1668, p. 327/en Drake, 1996, p. 216).

Johann Hieronymus Schröter (1745–1816) realizó una excelente descripción de la superficie lunar en su *Selenotopographische Fragmente* (1791–1802), que serviría de base en años posteriores para la interpretación de su fisiografía. Suele señalarse a Franz von Paula Gruithuisen (1774–1852) como el primero en sugerir que los cráteres de la Luna eran debidos a impactos de meteoritos (Gruithuisen, 1828); no obstante, en esas primeras décadas del siglo xix hubo dos sugerencias anteriores: los hermanos Marschall von Bieberstein, en 1802, y Karl E. von Moll (1760–1838), en 1815, también hicieron la misma propuesta para explicar la craterización de nuestro satélite, pero todas estas ideas prácticamente pasaron inadvertidas, y pronto fueron olvidadas. Richard A. Proctor (1837–1888) y Albrecht Meydenbauer (1834–1921) discutieron una idea

parecida (Proctor, 1873, pp. 340–347, 1878; Meydenbauer, 1877, 1882), aunque no quedó claro que los grandes cráteres lunares, los *mares*, se hubiesen formado por una “lluvia de meteoritos”. Hasta finales de ese mismo siglo, la craterización por impacto no sería desarrollada como hipótesis científica por Grove Karl Gilbert (1842–1918). Aplicó a la superficie lunar las técnicas y métodos geomorfológicos y geofísicos que había desarrollado con gran habilidad en sus estudios de los Grandes Lagos, y a pesar de algunas dificultades, especialmente el carácter circular de las formaciones lunares que implicaba una dirección prácticamente vertical de las colisiones, concluyó que los cráteres habían sido consecuencia de impactos meteoríticos (Gilbert, 1892); sin embargo, cuando implementó ese mismo método en Coon Boot, el gran cráter de Arizona, descartó esa posibilidad, y sus ideas también fueron abandonadas ante la predominancia, por otro lado, de la hipótesis volcánica.

Las primeras décadas del siglo xx fueron trascendentales para la concreción de la hipótesis del impacto, tras el reconocimiento de que en la Tierra también existían este tipo de estructuras, como el cráter Meteor en Arizona, descartado previamente por Gilbert. En 1916, Ernst Julius Öpik (1893–1985) publicó un pequeño artículo en el que llegaba a la conclusión, igual que Nikolai A. Morozov (1854–1946) unos años antes, de que los cráteres lunares eran fruto de explosiones causadas por el impacto de meteoritos (Öpik, 1916). Estas ideas serían defendidas por otros autores, como Herbert Eugene Ives (1882–1953), Alfred Lothar Wegener, y Algernon Charles Gifford (1861–1948).

Los trabajos experimentales de Ives (1919) y Gifford (1924, 1930) llegaron a la conclusión de que, independientemente del ángulo de impacto, el resultado sería siempre una estructura circular, y que lo importante no era el tamaño del meteorito sino la energía desarrollada durante la colisión. En la década de los años 1940, las investigaciones de Ralph B. Baldwin (1912–2010) y Robert S. Dietz (1914–1995) darían el respaldo definitivo a la hipótesis del impacto (Baldwin, 1949; Dietz, 1946).

La contribución de Wegener la llevó a cabo durante los meses de permanencia en 1918 en la universidad de Dorpat (Tartu, Estonia), algunos años después del desarrollo de su teoría del movillismo continental (García Cruz, 2012). Wegener no solo trabajó sobre la meteorología en el Báltico, de la que fue su impulsor más destacado, sino que también se interesó y participó en el debate sobre el origen de los cráteres lunares tras su visita a la zona crateriforme de Kalijärv, en la isla de Ösel (actual Saaremaa). En el Instituto de Física de Marburgo realizó diversos experimentos para comprobar la hipótesis del impacto (Wegener, 1919, 1920a,b), que se concretarían en una pequeña obra sobre este tema, *Die Entstehung der Mondkrater* (Wegener, 1921a,b,c).

Para dilucidar qué hipótesis era la más adecuada para explicar el origen de los cráteres lunares, Wegener utilizó el método hipotético–deductivo basado en desarrollar experimentos en el laboratorio que simularan el impacto de meteoritos, analizó la morfología de las estructuras resultantes, y las comparó por analogía con los caracteres de nuestro sa-

1 En relación con la historia de la investigación sobre los cráteres de impacto, véanse, por ejemplo, Drake y Komar (1984), Glen (1994, pp. 7–38), Hiesinger (2015), Hoyt (1984, cap. 1), Koeberl (1999, 2002, pp. 745–747), Krinov (1963), Mark (1987, cap. 9), Marvin (1990, 2002), McCall (2006), Montanari y Koeberl (2006, pp. 1–7), Powell (2015, 3ª parte), Racki et al. (2014), Saunders et al. (1970), Schultz (1998); sobre la contribución de Wegener, expresamente, véanse Czegka (1996), Greene (1998, 2015, cap. 15), Wutzke (2000).

télite, considerando previamente que las burbujas, las mareas de magma, y la actividad volcánica no satisfacían esta explicación puesto que se trataba de supuestos erróneos de los que se derivaban conclusiones equivocadas. Wegener no fue el primero en diseñar modelos empíricos en este sentido, pero sí el que lo hizo de una forma sistemática, tanto en relación con los cuerpos impactantes como con la estructura de la superficie del impacto; aunque siempre tuvo como referencia el principio del actualismo, poseía un enfoque neocatastrofista puesto que su hipótesis entraba dentro de los procesos catastróficos de alta energía. Por otro lado, para su razonamiento lógico Wegener recabó información y datos sobre todo geofísicos, pero también geológicos, astronómicos, tectónicos... que recuerdan el desarrollo unos años antes de su teoría sobre el movi­lismo continental, de donde tomó algunas observaciones en contra de las hipótesis precedentes, como, por ejemplo, la distribución de las áreas volcánicas, caótica en la Luna mientras que en la Tierra sigue unas determinadas directrices tectónicas.

La relevancia de este trabajo va más allá del hecho de que los resultados obtenidos fueran concluyentes a favor de la hipótesis del impacto. Wegener analizó también otros aspectos importantes en su comparación entre la Tierra y la Luna, como la estructura de la superficie de ambos cuerpos para los que supuso un origen común por acreción.

A pesar de que este trabajo fue ignorado por algunos teóricos impactistas, sobre todo en Norteamérica, esta aportación al origen de los cráteres lunares hace una vez más de Alfred Wegener una de las figuras más importantes de la ciencia en los inicios del siglo xx.

NOTA SOBRE LA PRESENTE TRADUCCIÓN

Esta traducción es la primera versión en lengua castellana directamente del alemán del trabajo de Wegener sobre el origen de los cráteres lunares, y la primera completa a cualquier otro idioma. Se ha utilizado una copia del ejemplar conservado en la Bibliotheca Albertina (Universidad de Leipzig), de donde se han obtenido también las ilustraciones con la máxima calidad posible. Existe una versión inglesa (1975), en la que, como reconoce el traductor (A.M.C. Şengör), se han tomado bastantes libertades con el lenguaje utilizado, y quizás por eso contiene varios anacronismos y algunos errores y omisiones (por ejemplo, sólo reproduce tres de las nueve ilustraciones del original). Se han introducido dos modificaciones que no alteran la comprensión del texto: por un lado, se han suprimido como tales las Láminas I, II y III, para facilitar la inserción de las figuras 3-4, 5-7 y 9, respectivamente, como ilustraciones independientes; por otro lado, las notas a pie de página se han vuelto a numerar desde el principio del texto (y no para cada página), a las que se han añadido algunas notas de la traducción [NT] con observaciones y aclaraciones; siempre que ha sido posible, se ha completado también la información aportada por Wegener en sus propias notas.

AGRADECIMIENTOS

Estoy en deuda, una vez más, con Elia Hernández Socas (Institut für Angewandte Linguistik und Translatologie, Universität Leipzig), y con Alejandro García Francisco (La Laguna, Tenerife), por su inestimable ayuda.

BIBLIOGRAFÍA

Baldwin, R.B. (1949). *The face of the Moon*. University of Chicago Press, Chicago, 239 pp.

Czegka, W. (1996). The contributions of Alfred Wegener to meteoritics and early impact research. *Meteoritics & Planetary Science*, 31, 33-34.

Dietz, R.S. (1946). The meteoritic impact origin of the moon's surface features. *Journal of Geology*, 54(6), 350-375.

Drake, E.T. y Komar, P.D. (1984). Origin of impact craters: Ideas and experiments of Hooke, Gilbert, and Wegener. *Geology*, 12(7), 408-411.

Galilei, G. (1610). La Gaceta Sideral. En: *El mensaje y el mensajero sideral*. Alianza, Madrid (trad. castellana 1984), pp. 29-90.

García Cruz, C.M. (2012). Alfred Lothar Wegener (1880-1930), una vida para la ciencia. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20(1), 4-26.

Gifford, A.C. (1924). The mountains of the Moon. *New Zealand Journal of Science and Technology*, 7, 129-142.

Gifford, A.C. (1930). The origin of the surface features of the Moon. *New Zealand Journal of Science and Technology*, 11, 319-327 [reproducido en: *Scientia*, 48, 69-77 (1930), con una trad. francesa en la misma revista, *Suppl.* 31 (1930), y *Proceedings of the Royal Astronomical Society of Canada*, 25, 70-78 (1931)].

Gilbert, G.K. (1892). The Moon's face. A study of the origin of its features. *Bulletin of the Philosophical Society of Washington*, 12, 241-292 [reproducido como obra independiente por la Philosophical Society, Washington (1893), 52 pp.].

Glen, W. (1994). *The mass extinction debates. How science works in a crisis*. Stanford University Press, Stanford (CA), 371 pp.

Greene, M.T. (1998). Alfred Wegener and the origin of lunar craters. *Earth Science History*, 17(2), 111-138.

Greene, M.T. (2015). *Alfred Wegener: Science, exploration, and the theory of continental drift*. Johns Hopkins University Press, Baltimore (MD), 675 pp.

Gruithuisen, F. von P. (1828). *Analekten für Erd- und Himmelskunde*. J. Palm, München, vol. I, Nº I-VII, [625 pp.].

Hiesinger, H. (2015). Lunar impact cratering: A brief review and perspective. *Workshop on Issues in Crater Studies and the Dating of Planetary Surfaces*, Nº 9030, 2 pp.

Hooke, R. (1665). *Micrografía*. Alfguara, Madrid (trad. castellana 1989), 742 pp.

Hooke, R. (1668-1700). Lectures and discourses of earthquakes, and subterranean eruptions. En: Waller, R. (ed.) (1705). *The posthumous works of Robert Hooke*. Smith & Walford, Londres, pp. 277-450 [reproducido en Drake, E.T. (1996). *Restless genius. Robert Hooke and his earthly thoughts*. Oxford University Press, Oxford-Nueva York, pp. 159-365].

Hoyt, W.G. (1984). *Coon mountains controversies*. University of Arizona Press, Tucson (AZ), 442 pp.

Ives, H.E. (1919). Some large-scale experiments imita-

ting the craters of the moon. *The Astrophysical Journal*, 50, 245–250.

Koeberl, C. (1999). Craters on the Moon from Galileo to Wegener: A short history of the impact hypothesis, and implications for the study of terrestrial impact craters. *Earth, Moon and Planets*, 85–86(1–3), 209–224 (publicado en 2001).

Koeberl, C. (2002). Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. *Mineralogical Magazine*, 65(5), 745–768.

Krinov, E.L. (1963). Meteorite craters on the Earth's surface. En: Middlehurst, B.M. y Kuiper, G.P. (eds.). *The moon, meteorites and comets*. Chicago University Press, Chicago, pp. 183–207.

Mark, K. (1987). *Meteorite craters*. University of Arizona Press, Tucson (AZ), 288 pp.

Marschall von Bieberstein, G.W. y Marschall von Bieberstein, E.F.L. (1802). *Untersuchungen über den Ursprung und die Ausbildung der gegenwärtigen Anordnung des Weltgebäudes*. G.F. Heyer, Guissen–Darmstadt, 266 pp.

Marvin, U.B. (1990). Impact and its revolutionary implications for geology. En: Sharpton, V.L. y Ward, P.D. (eds.). *Global Catastrophes in Earth History*. Geological Society of America, Sp. Pap., 247, 147–154.

Marvin, U.B. (2002). Geology: from an Earth to a planetary science in the twentieth century. En: Oldroyd, D.R. (ed.). *The Earth inside and out: some major contributions to Geology in the Twentieth Century*. Geological Society of London, Sp. Publ., 192, 17–57.

McCall, G.J.H. (2006). Meteorite cratering: Hooke, Gilbert, Barringer and beyond. En: McCall, G.J.H., Bowden, A.J. y Howarth, R.J. (eds.). *The history of meteoritics and key meteorite collections: fireballs, falls and finds*. Geological Society of London, Sp. Publ., 256, 443–469.

Meydenbauer, A. (1877). Über die Bildung der Mondoberfläche. *Sirius* 10 (N.F. 5), 180.

Meydenbauer, A. (1882). Die Gebilde der Mondoberfläche. *Sirius*, 15 (N.F. 10), 59–64.

Moll, K.E. von (1815). *Über den Zusammenhang der Gebirgsbildung mit dem Erscheinen der Feuerkugeln*. München.

Montanari, A. y Koeberl, C. (2006). *Impact stratigraphy: The Italian record*. Springer, Berlín–Heidelberg, 366 pp.

Öpik, J.E. (1916). Nota sobre la teoría meteórica de los circos lunares. *Mirovédenié (Boletín de la Sociedad Rusa de Amigos del Estudio del Universo)*, 5(21), 125–134 (en ruso con resumen en francés) [existe trad. inglesa en: Racki et al. (2014), pp. 1869–1874].

Powell, J.L. (2015). *Four revolutions in the Earth Sciences: from heresy to truth*. Columbia University Press, Nueva York, 352 pp.

Proctor, R.A. (1873). *The Moon: her motions, aspect, scenery, and physical conditions*. Longmans–Green, Londres, 394 pp.

Proctor, R.A. (1878). The Moon's myriad small craters. *Belgravia*, 36, 153–171 [reimpr. en: Proctor, R.A. (1881). *The poetry of astronomy*. Wiman, Londres, pp. 182–214].

Racki, G., Koeberl, C., Viik, T., Jagt–Yazikova, E.A. y Jagt, J.W.M. (2014). Ernst Julius Öpik's (1916) note on the theory of explosion cratering on the Moon's surface—The complex case of a long–overlooked benchmark paper. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(10), 1851–1874.

Saunders, R.S., Haines, E.L. y Conel, J.E. (1970). Morphology and origin of lunar craters. *Polarforschung*, 7(40), 33–53.

Schultz, P.H. (1998). Shooting the Moon: understanding the history of lunar impact theories. *Earth Science History*, 17(2), 92–110.

Wegener, A.L. (1920a). Versuche zur Aufsturztheorie der Mondkrater. *Nova Acta, Abhandlungen der Leopoldinisch–Carolinischen Deutschen Akademie der Naturforscher*, 106(2), 107–117.

Wegener, A.L. (1920b). Die Aufsturzhypothese der Mondkrater. *Sirius*, 53, 189–194.

Wegener, A.L. (1921a). *Die Entstehung der Mondkrater*. F. Vieweg, Brunswick [existe trad. inglesa: The origin of lunar craters. *Earth, Moon, and Planets*, 14(2), 211–236 (1975)].

Wegener, A.L. (1921b). Die Entstehung der Mondkrater. *Naturwissenschaften*, 9(30), 592–594 [este artículo y el siguiente son resúmenes de Wegener (1921a)].

Wegener, A.L. (1921c). Das Antlitz des Mondes. *Umschau*, 25, 556–560.

Wutzke, U. (2000). Alfred Wegener (1880–1930) und die Entwicklung der Vorstellungen über die Entstehung der Erde –eine Einführung. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 51, 76–78.

EL ORIGEN DE LOS CRÁTERES LUNARES²

Dr. ALFRED WEGENER

Profesor asociado³ de Geofísica, Universidad de Hamburgo⁴

Traducción castellana de Cándido Manuel García Cruz (INHIGEO)

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.
2. Discusión de la hipótesis de la burbuja.
3. Discusión de la hipótesis mareal.
4. Discusión de la hipótesis volcánica.
5. Antecedentes de la hipótesis del impacto.
6. Experimentos propios sobre la hipótesis del impacto.
7. El cráter meteorítico de Arizona.
8. Resumen.

INTRODUCCIÓN

Sobre el origen de los cráteres lunares existe en la literatura especializada una diferencia de opinión bastante considerable. Hay al menos cuatro hipótesis distintas: la hipótesis de la burbuja, la hipótesis mareal, la hipótesis volcánica y la hipótesis del impacto. También han existido durante décadas numerosas hipótesis que son combinaciones de las anteriores, concretamente de la hipótesis volcánica con las otras, pero aún no se ha alcanzado una opinión que sea aceptada por todos.

El problema no parece ser irresoluble. Si pudiéramos conocer el orden en que se han formado los mares lunares, los mares crateriformes, las montañas anulares, los cráteres con pico central o sin él, las hileras de cráteres, las gargantas, los valles, las fosas, los sistemas radiales, etc., con la exactitud que nos permitiera ver las leyes que gobiernan la formación de estos caracteres, que siempre han parecido ser totalmente irregulares y caóticos, entonces sería posible al menos decidir qué hipótesis es la respuesta más probable a esta cuestión. Ya hemos alcanzado el límite de esa precisión gracias a la nitidez de las sombras que se proyectan sobre

la Luna carente de atmósfera. Bajo condiciones favorables odems reconoer objetos como pequeños puntos que tienen un diámetro de hasta 50 m. Con mayor aumento podríamos descubrir gran cantidad de pequeños caracteres; sin embargo, para llegar a comprender los caracteres más prominentes, cuya explicación será nuestro tema principal, esto no sería una gran contribución. Con toda probabilidad las irregularidades causales sólo se harían más sorprendentes. Como muestran los trabajos de Ebert, Mainka, Franz y otros, conocemos mucho mejor los caracteres de la cara visible de la Luna que los de nuestra Tierra. Con los trabajos de Landerer⁵ sobre el ángulo de polarización de las rocas lunares, que fueron claramente apoyadas por la demostración de Ebert⁶ con bloques de cristal, hemos obtenido ideas relevantes sobre la naturaleza de las rocas que forman la corteza de la Luna y el material que dio lugar a estas formas superficiales.

El propósito de los párrafos que siguen es examinar las cuatro hipótesis mencionadas anteriormente a la luz de nuevos criterios proporcionados por la geofísica, donde jugarán un papel decisivo los experimentos sobre cráteres de impacto realizados por el autor durante el invierno de 1918/19. Este enfoque está basado en que la hipótesis de la burbuja y la hipótesis mareal parecen ser conclusiones erróneas⁷ evidentes, y se mostrará que la hipótesis volcánica es insostenible, mientras que, por otro lado,

² [NT: Referencia original: Wegener, A. (1921). Die Entstehung der Mondkrater. F. Vieweg, Brunswick, 48 pp.].

³ [NT: En el original, Privatdozent. En el ámbito germanoparlante, este término se refiere a la persona que por su formación académica ejerce como profesor asociado o asistente en una universidad, pero que está en condiciones de obtener la habilitación equivalente a la de Profesor Titular en España].

⁴ [NT: Cuando se publicó esta obra, en 1921, Wegener ya se había reincorporado a la universidad de Hamburgo, aunque todos los experimentos que se describen aquí sobre los cráteres lunares los había realizado durante su estancia en el Instituto de Física de Marburgo (invierno de 1918–1919); véase la nota 48].

⁵ [NT: Véase la nota 56].

⁶ [NT: Véase la nota 57].

⁷ [NT: Wegener utiliza aquí y más adelante el término Trugschluss (en otros párrafos Fehlschluss, pero siempre dentro del mismo contexto), que se ha traducido en su primera acepción como conclusión errónea o equivocada; puede también tener el significado de falacia, que normalmente se le da el sentido de engaño o fraude, pero no es éste el caso que quiere indicar el autor dentro de su razonamiento lógico].

la hipótesis del impacto está apoyada por pruebas abrumadoras.

DISCUSIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA BURBUJA

La hipótesis de la burbuja ha sido defendida en los últimos tiempos en particular por F. Sacco⁸. Entre los partidarios más antiguos están Secchi, R. Hooke, T. Bergeron, A. St. Claire, Humphreys y Pui-seux. También deben mencionarse Paul Lehman, G. Dahmer entre otros. Entre estos autores es posible encontrar alguna diferencia de opinión, pero la idea común importante es que las montañas anulares se originaron como restos de grandes burbujas que explotaron y que se habían formado en un magma caliente y viscoso. R. Hooke, Poulette Scrope, Bergeron, Stewart Harrison, De Beaumont, Gorini, St. Mennier, F. Sacco, G. Dahmer, entre otros, han intentado explicar y apoyar este punto de vista mediante experimentos. “Estos investigadores utilizaron diferentes sustancias pastosas como yeso, cal, azufre, cera y arcilla, y al enfriar estas sustancias, permitieron que se elevaran algunas burbujas sobre esas masas”⁹. Algunas veces se produjeron burbujas simplemente por aireación del material, pero por lo general se originaron al calentarlo. Una prueba de estos experimentos realizados por mí, que también confirmaron las fotografías publicadas por Dahmer¹⁰, demostró que la semejanza entre los muros anulares experimentales y los de la Luna son sólo superficiales, y los cráteres de burbuja no pudieron mostrar las proporciones características de los perfiles de los cráteres tal y como consiguió Ebert.

Es fácil mostrar que la hipótesis de la burbuja se basa en una conclusión equivocada. Para ello necesitamos recoger algo más de información. Si pasamos de los experimentos de laboratorio a las dimensiones cósmicas, debemos ser muy cuidadosos en cuanto a si estamos tratando con fuerzas moleculares o con fuerzas másicas¹¹. En esta transición de los experimentos a las dimensiones cósmicas, las proporciones entre las dos fuerzas llegan a invertirse. En el laboratorio sólo se trabaja con fuerzas moleculares, con la excepción del peso que casi siempre aparece como un problema. Para detectar la fuerza másica de la gravedad, aunque sólo sea cualitativamente, debemos usar instrumentos muy sensibles. En el Cosmos es totalmente diferente,

8 F. Sacco, artículo “Selenologie” en *Handwörterbuch der Naturwissenschaften*, vol. 9, p. 7, Jena 1913.

9 [NT: Esta frase entrecorrida (y toda la información que le precede) pertenece a la cita de la nota 8].

10 G. Dahmer, *Die Gebilde der Mondoberfläche*, Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Paläont., 1911, I, pp. 89–113. Véase también la misma revista 1912, II, pp. 42–44.

11 [NT: En el original, *Massenkraft*; aunque equivale a fuerza inercial o centrífuga, se ha traducido como fuerza másica puesto que Wegener la relaciona más con el efecto de la fuerza de la gravedad sobre las masas que con cualquier otro aspecto dinámico de los significados anteriores].

puesto que cuanto mayores son los cuerpos, las fuerzas moleculares no aumentan, pero sí lo hacen las fuerzas másicas. Por lo tanto, en astronomía las fuerzas moleculares del magnetismo, la electricidad, la tenacidad, etc., son eclipsadas por la fuerza de la gravedad en tal medida que antes de la introducción del análisis espectral, la física del Cosmos se componía esencialmente de la ley de la gravitación de Newton. Un ejemplo podría ilustrar esto: el cuarzo cristaliza en prismas hexagonales. La forma está controlada por las fuerzas moleculares, mientras que la propia gravedad del cristal no afecta al proceso de crecimiento. Supongamos un cristal de cuarzo en el espacio del tamaño de la Tierra, con lo que, debido a la inmensa desviación de la forma esférica, la propia gravedad del cristal causaría tales diferencias de presión y tensiones en las distintas partes del cristal, que se superaría su resistencia. El cristal se deformaría, proyectando estas partes a lo largo de sus caras pulidas que se deslizarían hasta posiciones más próximas al centro de gravedad; o a través de un flujo continuo la masa total se aproximaría a la forma de una esfera. La forma esférica de los cuerpos celestes muestra el dominio de las fuerzas másicas sobre las fuerzas moleculares. Los meteoritos, las lunas más pequeñas de los planetas, y los asteroides son demasiado pequeños para resistir esta interacción de la fuerza de la gravedad. La Luna y la Tierra en gran medida están superadas por la fuerza, pero las montañas muestran hasta qué grado permanecen efectivas aquí las fuerzas moleculares. Las montañas de la Luna son más escarpadas y más altas que algunas de la Tierra¹² no sólo por la ausencia de erosión, sino debido especialmente a que la fuerza de la gravedad de la Luna es sólo una sexta parte de la de la Tierra¹³.

De estas consideraciones se deduce que podemos transferir a las dimensiones cósmicas sólo aquellos experimentos que estén basados en las fuerzas másicas y no en fuerzas moleculares. La formación de burbujas, sin embargo, está completamente basada

12 *Entre 1.095 medidas de altitud, Mädler encontró seis picos entre los 6.000 y 7.000 m, 21 entre 5.000 y 6.000 m, y 82 entre 4.000 y 5.000 m sobre el terreno circundante. [NT: Wegener se refiere a los trabajos de Johann Heinrich von Mädler (1794–1874), en colaboración con Wilhelm Beer (1797–1850), sobre cartografía lunar; véase Beer, W. y Mädler, J.H. von (1837). Der Mond nach seinen kosmischen und individuellen Verhältnissen. S. Schropp, Berlín, 412 pp.; para los datos citados, véase en concreto §67, pp. 99–123].*

13 *No carece de interés que estas ideas, entre otras muchas incoherencias, fueron establecidas claramente por Gruithuisen en su Analekten für Erd- und Himmelskunde (vol. 2, p. 48, Múnich, 1828). “Estamos tratando aquí con masas totalmente rígidas; sólo el efecto de la gravedad supera su solidez con mayor facilidad conforme las masas aumentan; daría la impresión de que las mayores moles se hundían en la Luna, por lo que su total rigidez sería como la de otros cuerpos celestes; hablando figuradamente, los cuerpos celestes se comportan más como masa o arcilla suelta conforme se hacen más grandes, incluso si la Luna hubiera sido siempre tan rígida como lo es actualmente, tendría una forma esférica”. [NT: La referencia que da Wegener de la citada obra de Gruithuisen es errónea; la frase pertenece realmente al vol. 1, N^o ii, p. 57 (1828)].*

en la fuerza molecular de la tensión superficial. Es posible que se formen burbujas de diferentes tamaños de acuerdo con el valor de esta tensión superficial, pero siempre se mantienen dentro de ciertos límites. Además, en la Luna no pueden existir, ni podrían haber existido, grandes burbujas. Esto es suficiente para descartar completamente la hipótesis de la burbuja. Aquél que desee explicar el origen de los gigantescos caracteres lunares de cientos de kilómetros de diámetro con burbujas deshechas comete el mismo inmenso error que quien desee explicar la flotación de un trasatlántico –análogo a la flotación de los chinchas de agua y los tejedores, incluso de una aguja– por medio de la tensión superficial.

DISCUSIÓN DE LA HIPÓTESIS MAREAL

La hipótesis mareal ha sido defendida, entre otros, por Faye, H. Ebert y Hannay, y también por Scheiner como la más probable en su *Populäre Astrophysik* (pág. 493, Leipzig y Berlín, 1908). Ebert la formula de la siguiente forma¹⁴:

“Consideremos un cuerpo planetario líquido e incandescente que se enfría por radiación en todas direcciones, de tal forma que, sobre su superficie, se formarían témpanos solidificados que flotan en el magma aún líquido. En el caso de la Luna, la atracción de la Tierra causó una gran onda mareal de las partes líquidas. La Luna gira bajo esta onda mareal y por lo tanto en toda su superficie se levanta y se hunde alternativamente el magma líquido; durante cada marea alta se inundan estos témpanos sólidos, luego se retira con la llegada del reflujo, juego que se repite durante la próxima marea”.

Ebert mostró en una interesante conferencia sobre el origen de los volcanes de lodo que, mediante dichas emanaciones periódicas del líquido fundido a través de fisuras en la corteza superficial, la forma de los cráteres que se producen realmente se asemeja a los cráteres lunares. Utilizó la aleación metálica de Wood¹⁵ (punto de fusión 68°) que se mantuvo líquida en un recipiente abierto climatizado de vapor, mientras que la superficie de la aleación se enfrió y se solidificó. El nivel de la aleación se podía cambiar por medio del émbolo de una bomba. La base de los cráteres resultantes era, por lo general, más baja que el nivel del área circundante. En unos cuantos casos, que corresponden al cráter rellenado Wargentín de la Luna, la solidificación se producía en el nivel más alto del líquido fundido. El ángulo de la ladera interior de la pared anular era de 34° y en la ladera exterior de 5°. Sobre la formación accidental de un pico central, que realmente fue una de las diversas deformaciones del fondo del cráter que se produjeron durante el experimento, Ebert afirmaba: “Cuando todo el fondo se

solidifica y sólo queda un pequeño pasadizo libre, el magma brota y forma un cono central, algunas veces abrupto, otras suave, pero nunca sobrepasa la altura de las paredes que lo rodean”¹⁶. De todos modos, los experimentos muestran que a través de la elevación y caída periódica del magma en agujeros, que no tienen por qué haber sido circulares, pueden obtenerse caracteres que comparten muchas características con los cráteres lunares.

No parece que sea posible la existencia de mareas y reflujos del magma líquido que se observarían en las grietas de la corteza lunar sólida más externa. Porque en este caso se requeriría una corteza sólida y firme que mantenga su forma a pesar de las ondas mareales de su base. Y esto es imposible. La flotación o isostasia de la corteza firme en la Tierra ya es conocida. Si, por ejemplo, la corteza queda cubierta por una capa de hielo, entonces, aunque con cierto retraso, se hunde, por la isostasia, para conservar el balance de la presión, de forma similar al hielo que al flotar sobre el agua se hunde cuando está cargado. Después de la fusión del hielo, las terrazas arenosas, que se formaron cuando la masa continental estaba en su posición inferior, vuelven a elevarse y muestran, como en Canadá y Escandinavia, que estas áreas estuvieron deprimidas 500 o 200 m. Incluso en la Luna tendríamos que asumir que la corteza flota sobre su base, o al menos flotaba en una época en que la base estaba aún líquida. El experimento de Ebert sólo es válido para recipientes en los que la corteza superficial se adhiere a las paredes de estos, pero saldría mal si intentásemos repetirlo en un lago de 500 m de diámetro. Por lo tanto, la corteza de la Luna debe haber seguido las fluctuaciones de la marea. La hipótesis de Ebert mencionada antes es tan imposible como intentar medir la marea y el reflujo desde el hielo que flota en el Mar del Norte.

Se ha intentado utilizar el experimento de Ebert para explicar el origen de los cráteres lunares, pero intentando adscribir la elevación del magma a otras causas que las mareas, como repetidas explosiones de gas dentro de una base fluida, u otras manifestaciones volcánicas. Pero entonces la causa es simplemente volcánica, y de esto trataremos en la siguiente sección.

DISCUSIÓN DE LA HIPÓTESIS VOLCÁNICA

Una crítica algo más a fondo que las dos hipótesis previas requiere la hipótesis volcánica que ha sido defendida por muchos geólogos tales como Alexander von Humboldt, Leopold von Buch¹⁷, Dana, Eduard

14 H. Ebert, *Ein Vorlesungsversuch aus dem Gebiete der physikalischen Geographie (Bildung der Schlammvulkane und der Mondringgebirge)*. Ann. d. Phys. u. Chem., N. F. 41 (277), 351–363 (1890). [NT: concretamente, p. 362].

15 [NT: Esta aleación, conocida también como Metal de Wood, está formada por bismuto (50%), plomo (25%), estaño (12,5%) y cadmio (12,5%).]

16 [NT: Ebert (1890), op. cit. (nota 14), p. 358].

17 [NT: Wegener confunde la teoría de los cráteres de elevación de Leopold von Buch (1774–1853), como si formara parte de la hipótesis volcánica, cuando en realidad era una alternativa a los fenómenos volcánicos como origen de las grandes calderas; de hecho, para Buch los cráteres lunares eran de elevación y no volcánicos; véase Buch, L. von (1820) «Über die Zusammensetzung der basaltischen Inseln und über Erhebungs-Crater». Abhandlungen der physikalischen Klasse der Königl. Preussische Akademie der Wissenschaften (aus den Jahren 1818–1819), pp.

Suess, Branca, G. Tschermak, S. Günther, Studel, v. Wolff, y también por muchos astrónomos como Mädler, Schröter, Nasmyth y Carpenter, Pickering y otros. De acuerdo con este grupo, los cráteres lunares serían volcánicos. Según éstos, los que poseen un pico central corresponden a la forma del Vesubio cuyo cono central más joven está rodeado por el Monte Somma, más antiguo. Las llanuras anulares planas se comparan por lo general con los lagos de lava como el del Kilauea, los lagos de cráter de Italia, o los maares de Eifel. Von Wolff, por ejemplo, comparó los mares lunares con las erupciones terrestres superficiales o fisurales como las de Islandia: “El fondo de los mares lunares son el resultado de erupciones superficiales o lineales cuyos flujos de lava cubrieron una topografía ya existente”¹⁸, donde, sin embargo, las grandes cimas de las montañas, que en parte rodean los mares, siguen siendo inexplicables. En su interpretación de la superficie de la Luna como el resultado de la actividad volcánica, E. Suess tiene en cuenta los mares lunares, y a través de este método llega a una interpretación de los cráteres lunares de una manera muy diferente de la de los volcanes terrestres. Describe el desarrollo de la superficie de la Luna con las siguientes palabras¹⁹:

“La temperatura de su enorme masa no es completamente uniforme. En algún punto se eleva, consume la cubierta escoriácea y desde ese lugar la fusión se expande por igual en todas direcciones, a lo largo de cientos de kilómetros. La chimenea tiene la forma de sección transversal de una esfera y su perímetro es circular. Por último, el acontecimiento se aproxima a su fin; la temperatura de la superficie de la chimenea es más baja en sus bordes; ya no se consume más escoria, sino que es tan solo expulsada hacia afuera como una morrena. Ahora todo se interrumpe. Lo que queda es una vasta superficie llana, rodeada de un edificio circular que tiene perfiles agrestes, una pared escoriácea con una ladera abrupta interna dirigida hacia la superficie recién solidificada, cuya altura puede alcanzar muchos miles de pies. Estas paredes de escoria, conocidas como Apeninos, Alpes, etc., rodean el Mare Imbrium”. Suess quiere explicar, como ya he mencionado, los cráteres, los mares y las

51–68; reproducido en: (Leonhard's) Taschenbuch für die gesamte Mineralogie, 15(2), 391–427 (1821), y en: Ewald, J., Roth, J. y Dames, W. (eds.) (1877). Leopold von Buch's Gesammelte Schriften. G. Reimer, Berlin, tomo 3, pp. 3–19. Esta idea sería defendida, entre otros autores, por Alexander von Humboldt (1769–1859), citado también aquí por Wegener; véase Humboldt, A. von (1845). Cosmos, Ensayo de una descripción física del mundo. Los Libros de la Catarata–CSIC, Madrid (trad. castellana 1874, ed. 2011), vol. I, p. 237; véase, además, García Cruz, C.M. (2016). Leopold von Buch (1774–1853), las islas Canarias y el origen de la teoría de los cráteres de elevación. Lull, 39(83), 73–101.

18 J. v. Wolff, Der Vulkanismus, I, Stuttgart 1914. [NT: concretamente, p. 654].

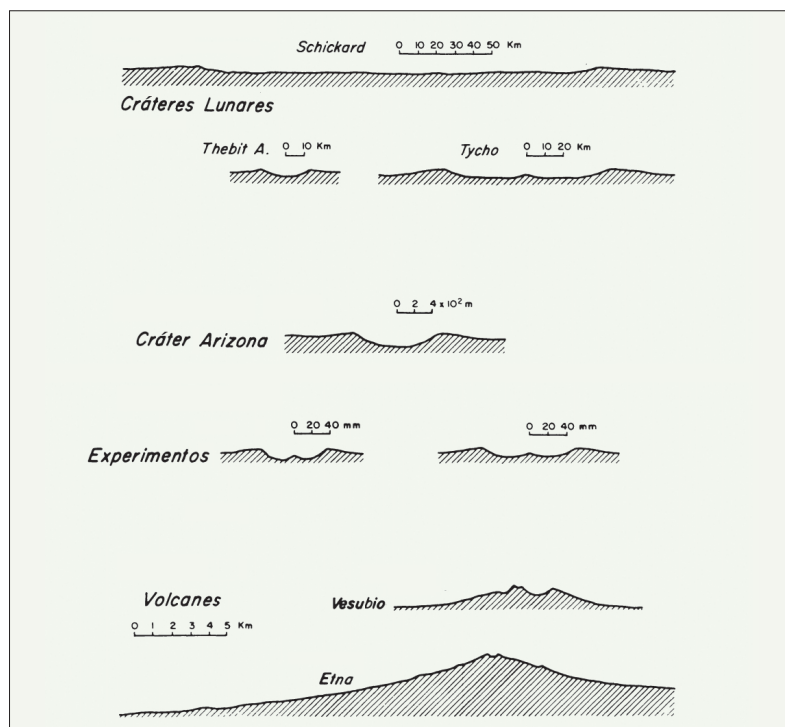
19 E. Suess, Einige Bemerkungen über den Mond, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (1), 104, 21–54 (1895). [NT: p. 38]. Véase también en la misma revista (1) 116, 1355–1361 (1907), también en Das Antlitz der Erde III (2), p. 627. [NT: véase en la versión castellana: Suess, E. (1909). La Faz de la Tierra. R. Velasco, Madrid, vol. iv (trad. castellana 1930), cap. xxvi, pp. 363–373].

grandes llanuras circulares de esta manera, pero esto le conduce al dilema de que para explicar incluso las formas más pequeñas debe remontarse a la hipótesis volcánica ordinaria. Se puede sostener en contra de su explicación, dada la claridad de su descripción, que las grandes inundaciones basálticas nunca expulsaron tales paredes escoriáceas como morrenas y las depositaron en la periferia, lo que sería difícil de comprender porque el factor indispensable para la formación de las morrenas²⁰, la fusión de un glaciar, está completamente ausente.

Cabe señalar aquí que es posible modificar la hipótesis volcánica y darle muchas formas, en realidad, ya se han experimentado dichas transformaciones. Los mencionados experimentos de Ebert provocaron una modificación. Conforme salimos de la comparación con las típicas formas volcánicas terrestres, entramos en el campo de las puras especulaciones que tampoco pueden probarse ni refutarse debido a que no tenemos experiencia con alguna representación real de procesos aceptados. Evitemos estas explicaciones especulativas en el presente estudio, porque, como se mostrará, la hipótesis del impacto proporciona una explicación completamente satisfactoria cuyo razonamiento puede ser comprobado por la experiencia. Nos limitaremos aquí a la comparación de los cráteres lunares con los volcanes terrestres típicos.

20 [NT: La referencia a una supuesta presencia de morrenas en la Luna es una alusión a las ideas de Edward Frankland (1825–1899), quien había sugerido que nuestro satélite pudo haber pasado por una época glacial, y que algunos de sus caracteres, como valles, riachuelos y radios (en cursiva en el original), bien podrían deberse a la acción del hielo; véase Frankland, E. (1864). On the physical cause of the glacial epoch. Philosophical Magazine, (4th series), 27(183), 321–341 (concretamente, pp. 339–340). Estas ideas ni siquiera se pueden considerar un intento de “teoría glacial” para explicar el origen de los cráteres lunares].

Fig. 1. Perfiles de diferentes cráteres (escala real).



Una comparación de las formas nos conduce a dudar seriamente sobre la hipótesis volcánica. La similitud de las formas es bastante superficial. La estructura normal de un volcán terrestre –no importan aquí algunas raras excepciones– es una montaña escarpada en forma de cono con un pequeño cráter abierto en la cima; el fondo del cráter siempre está más alto que el terreno circundante. Léanse, por ejemplo, los resúmenes informativos de J. Schmidt (*Der Mond*, p. 203, Leipzig 1856) o de Von Wolff (*Der Vulkanismus* I, p. 450, Stuttgart 1914). Según Schmidt, por ejemplo, el Monte Etna tiene una altura de 3.274 m, un cráter abierto de 485 m con una profundidad de 105 m. Esta es la forma más predominante. Pero existe una gran cantidad de otras estructuras que se denominan volcanes de escudo, calderas de colapso, diques, domos, etc., cuyas formas son más comparables con los cráteres lunares. Las formas que proporcionan las mejores comparaciones, tales como los mares de Eifel o los lagos de cráter de Italia, son los productos de una larga meteorización y erosión, y esto no lo tenemos en la Luna. En la Luna, la forma normal de un cráter, especialmente de los recientes, es la de un plato cuyo fondo está algunos kilómetros por debajo del terreno circundante. Globalmente, un cráter lunar no es una montaña, como mostró Schröter por primera vez, y H. Ebert confirmó que las paredes que se levantan son suficientes para compensar el hundimiento del fondo: si las vertiésemos en su interior, lo rellenaríamos²¹. Estas diferencias no son solo muy llamativas por sí mismas, sino que también contrastan definitivamente con lo que sabemos sobre la naturaleza y la actividad de los volcanes. Puesto que el lugar de erupción de los magmas debe ser naturalmente una montaña, conforme el nuevo material asciende desde las profundidades se deposita como lava líquida, piedra pómez en forma de espuma, o nubes de ceniza volcánica. Las explosiones violentas solo tienen lugar en raras ocasiones, de tal forma que los antiguos depósitos son destruidos y el propio volcán alcanza la forma de un agujero hasta retomar una actividad normal. La forma típica de los cráteres lunares nos obliga a aceptar una hipótesis adicional, que la actividad volcánica en la Luna es distinta de la de la Tierra²². Perderíamos así la seguridad en la que basamos nuestras experiencias.

21 [NT: Tal y como lo expresa Wegener, parece que la idea se debe a Ebert, aunque en realidad se trata de la generalización conocida como Regla de Schröter a partir de medidas y datos de este autor, según la cual el material que forma las paredes de un cráter sería suficiente para rellenarlo; en otras palabras: durante la formación de un cráter se produce una redistribución del material de la superficie de impacto, creando una depresión rodeada de paredes con el material eyectado; véase Schröter, J.H. (1791–1802). *Selenotopographische Fragmente*. C.G. Fleckeisen–J.C. Baier, Lilienthal–Gotinga, 2 vols., 676+565 pp.].

22 [NT: Wegener rechaza esta hipótesis adicional porque aceptarla implicaría negar el uniformitarismo metodológico, es decir, el principio procedimental que afirma la constancia espacial y temporal de las leyes naturales, en este caso la universalidad de las leyes que rigen la actividad volcánica; más adelante insiste en ello por este mismo motivo].

Las dificultades aumentan si tenemos en cuenta el pico central. Algunos volcanes terrestres también tienen un pico central, como el Vesubio. Esto expresa el despertar de la actividad y la construcción del edificio volcánico, que tras largos períodos de tranquilidad el cráter más antiguo se erosionó y agrandó de forma considerable. Por lo tanto, el pico central es el punto más alto del volcán; en la cima, se ve el cráter activo que tiene el tamaño y la forma que es habitual para los volcanes. En la Luna son relativamente mucho más frecuentes los picos centrales sobre la superficie de las planicies deprimidas que a menudo tienen diámetros de cientos de kilómetros, y nunca alcanzan la altura de las paredes que los rodean, un anillo supuestamente más antiguo!, y por lo general no están en equilibrio con el nivel del terreno circundante. Nunca se ha visto encima de estos picos centrales un cráter normal abierto. Si están presentes en el umbral de visibilidad, sus diámetros raramente sobrepasan los 50 m. En consecuencia, mientras que tuvimos que forzar una hipótesis adicional diciendo que las fuerzas volcánicas en la Luna no crean montañas sino llanuras, depresiones en forma de plato de enormes dimensiones, tenemos que elaborar ahora otra hipótesis adicional que establece que, en el caso de los picos centrales que sólo forman dichos cráteres, son más pequeños que los terrestres. Hemos de abandonar una vez más aquí nuestras comparaciones con los volcanes terrestres y revisar los procesos sobre los que no tenemos experiencia. Pero eso significa que no podemos seguir manteniendo la hipótesis volcánica.

Esto resulta incluso más evidente si comparamos también los tamaños. No es como en la hipótesis anterior, que transferimos un experimento de laboratorio a otras dimensiones, sino que comparamos aquí caracteres idénticos en dos cuerpos celestes, de los que la Luna es el más pequeño, por lo que tiene sentido una equivalencia particularmente amplia no sólo de las formas sino también de los tamaños, y si nos permitiésemos la existencia de una diferencia sistemática de tamaño entre los volcanes, tendrían que ser en la Luna ligeramente más pequeños que los de la Tierra.

Las dimensiones de los volcanes terrestres no son insignificantes si consideramos la forma de sus montañas. Pero la Luna carece de éstas. Sin embargo, los cráteres volcánicos terrestres raramente alcanzan un diámetro de uno o más kilómetros. Ocasionalmente se encuentran cráteres volcánicos con diámetros de 10 km o más, como Askja en Islandia²³. Si comparamos el tamaño de los cráteres lunares, se llega a lo absurdo. Porque vemos aquí una serie ininterrumpida de caracteres cuyos tamaños varían desde el límite de visibilidad hasta varios cientos de kilómetros. Los caracteres típicos y más notables tienen entre 50 y 200 km de diámetro. Ofrecemos los últimos de esta larga lista según Franz²⁴:

23 En su trabajo que se citará más adelante [NT: véase nota 38], Gilbert da un diámetro medio de 18 km (máximo 24 km) para los diez cráteres volcánicos terrestres, pero estas formas han sido agrandadas por la erosión.

24 J. Franz, *Der Mond* (de Natur und Geisteswelt, 90), 2ª ed., p. 75, Leipzig, 1912.

	λ	β	DIÁMETRO (KM)
Funerius	+60°	-36°	124
Phocylides	-54	-52	124
Maurolycus	+14	-42	124
Posidonius	+29	+32	124
Pythagoras	-63	-63	140
Alphonsus	- 3	-13	143
Endymion	+53	+54	146
Vendelinus	+61	-16	149
Cleomedes	+57	+17	149
Boussignault	+69	-50	155
Stoffler	+ 7	-42	158
Maginus	- 6	-50	158
Langrenus	+61	- 8	158
Ptolomeus	- 2	- 9	161
Petavius	+59	-25	174
Gauss	+79	+36	183
W. Humboldt	+81	-27	189
Schiller	-38	-52	192
Riccioli	-76	- 3	192
Schickard	-54	-44	273
Clavius	-15	-58	248
Grimaldi	-67	- 6	254

Pero no se pueden separar de los siguientes objetos:

	λ	β	DIÁMETRO (KM)
Mare Humboldtianum	+80°	+60°	300
Otto Struve	-75	+23	310
Bailly	-70	-68	310

Con esto hemos alcanzado ya las dimensiones del Mare Crisium con un diámetro de 450-550 km, que es imposible en un principio distinguir este valor de las montañas periféricas casi circulares que tienen laderas interiores escarpadas y las exteriores suaves, de los mares de cráter mencionados anteriormente y de las montañas anulares. Y de esta forma alcanzamos la mayor dificultad aparentemente insalvable de la hipótesis volcánica: también otros mares distintos del Mare Crisium, como el Mare Serenitatis con un diámetro de 700 km, y el Mare Imbrium, cuyo diámetro alcanza poco más de 1000 km, que están rodeados por montañas periféricas casi circulares, no pueden excluirse de esta secuencia. En un sentido más amplio también son cráteres lunares y por lo tanto deben haberse originado de la misma forma. Los partidarios de la hipótesis volcánica naturalmente se resisten a esta conclusión, pero sus argumentos no son convincentes. La ausencia de un pico central en los mares, que fue puesto de relieve por Von Wolff, no puede distinguir éstos de los auténticos cráteres lunares debido a que un gran número de los últimos tampoco posee un pico central. Y la objeción realizada por Franz de que las montañas anulares de Mare Imbrium y Mare Serenitatis no están completas, tampoco es válida porque existen objetos entre los pequeños cráteres lunares con forma de pera en los que se desarrolla principalmente solo un lado de la pared anular (en la hipótesis del impacto esto se explica por la oblicui-

dad de la caída), y por otro lado en el Sinus Iridum, más pequeño, sólo esa parte de la pared anular está conservada, que representa la corteza sólida, en tanto que el resto que estaba en el magma aún líquido de Mare Imbrium tampoco se formó completamente, o se conservó y se fundió después. Para mostrar el cambio gradual en el tamaño, en la figura 2 se indican todos los cráteres lunares de mayor a menor. Sería jugar al escondite con los hechos si intentásemos separar los peldaños inferiores de esta escalera y pretendiéramos explicar sus orígenes de una forma fundamentalmente diferente de los superiores. Como se comentó antes, incluso E. Suess, aunque vulcanista, no lo intentó, sin embargo, no comprendió que los miembros más bajos de la serie no pueden explicarse por la misma hipótesis volcánica que los de arriba.

Creo que el razonamiento anterior es bastante convincente. La hipótesis volcánica no puede explicar estos hechos a menos que se acepte la suposición ya rechazada de que las fuerzas volcánicas en la Luna causan actividades totalmente diferentes a las de la Tierra.

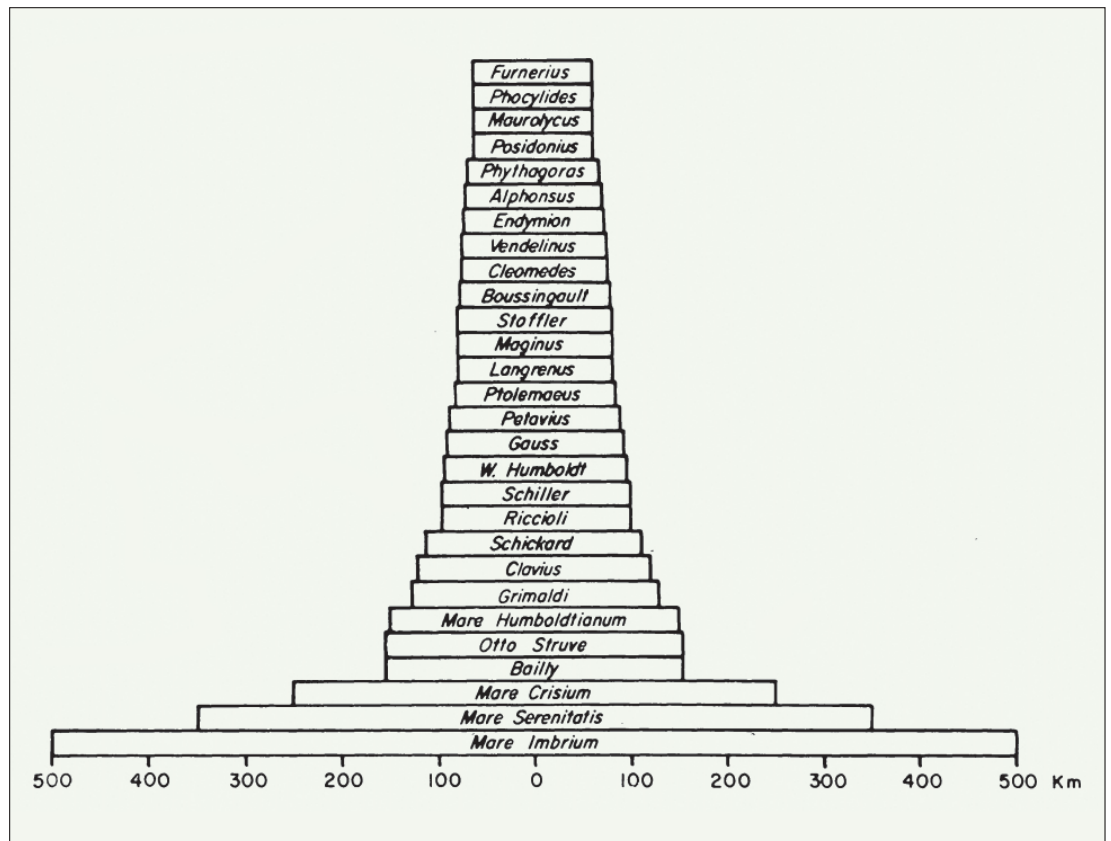
Es probable que pudiésemos finalizar aquí la revisión de la hipótesis volcánica en tanto que lo indicado es más que suficiente para rechazarla. Pero para completarla queremos echar un vistazo a la distribución y frecuencia de los cráteres y volcanes terrestres.

En la Luna se reconoce un enorme sistema de cráteres. Como señaló Franz por primera vez, los grandes mares, especialmente Mare Foecunditatis, Tranquilitatis, Serenitatis, Imbrium, Oceanus, Procellarum, Grimaldi y Mare Crisium, todos se encuentran en un cinturón que cruza el ecuador actual de la Luna en un ángulo aproximado de 21° y que probablemente se corresponde con una antigua zona ecuatorial. En los casquetes polares de esta zona ecuatorial, como sugiere el elevado albedo y la apariencia general de estos terrenos, los procesos de fusión, que son tan comunes en la zona de los mares, está ausente. La disposición de los cráteres individuales, sin embargo, muestra un desorden que fue resaltado por muchos autores, los cráteres más recientes parecen estar dispersos sin regla alguna aparente sobre los antiguos, y estos cráteres antiguos preexistentes no parecen haber afectado a la posición de los más recientes.

En la Tierra²⁵, no existe dependencia conocida de los volcanes sobre la latitud geográfica. Los volcanes de Alaska (60°) y de la Antártida (77°) están contruidos exactamente como los volcanes tropicales de Indochina, Sudamérica y África. Incluso los grandes mantos basálticos de Islandia no son diferentes de los del este de Abisinia, por debajo de una latitud de 10°. Sin embargo, la disposición de los volcanes terrestres no es la imagen detallada de una distribución al azar. En este caso, la situación

25 [NT: En este párrafo Wegener va a utilizar argumentos en contra de la hipótesis volcánica que forman parte de su teoría del moviismo continental que había desarrollado unos años antes; véase la traducción castellana de sus primeros trabajos al respecto: Wegener, A. (1912). *El origen de los continentes*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 20(1), 27-63 (2012)].

Fig. 2. Diámetro de los cráteres lunares más grandes



de un volcán estará determinada por las áreas volcánicas actuales, por lo tanto, no existe el riesgo de que se forme un caos de cráteres como en la Luna. Pero, sobre todo, los volcanes en la Tierra se relacionan principalmente con áreas de movimientos tectónicos, y esto es desde luego fácil de explicar, puesto que en estas áreas se crean fuerzas de compresión capaces de empujar las inclusiones magmáticas de la litosfera hasta la superficie. Así, los volcanes, por un lado, están junto a las zonas jóvenes de plegamientos montañosos de las Cordilleras y del sistema Alpes-Himalaya; por otro lado, siguen las zonas de fractura de los mares centrales de las Indias Occidentales hasta Indochina y el margen continental de Asia Oriental. Conforme aumenta el conocimiento geológico sobre las enormes presiones horizontales que crearon las montañas, y que se expresan en forma de grandes mantos plegados, y mediante nuevos estudios geofísicos que revelan los movimientos horizontales de los continentes, se están desarrollando nuevas visiones sobre el sistema de estos movimientos tectónicos²⁶. De acuerdo con estas ideas, los témpanos continentales son los remanentes comprimidos de una litosfera que cubrió una vez toda la Tierra, mientras que el fondo de los mares profundos representa la simasfera sobre la que están flotando los témpanos continentales, hasta una profundidad de un 95%. Durante este largo proceso de compresión continua de los remanentes de la litosfera se produce la erupción de las inclusiones barisféricas que acompañan el proceso. Como el tamaño de la Luna es mucho más pequeño,

se cuestiona si la corteza de la Luna también ha experimentado dichos procesos, o si los sufre todavía. De hecho, en la Luna no existen tales caracteres que podamos comparar con las áreas continentales y las montañas plegadas de la Tierra. Aunque los mares lunares se asemejan a las profundas cuencas marinas de la Tierra y podemos reconocer incluso un pequeño “desplazamiento continental” de las áreas periféricas noroccidentales del Mare Imbrium hacia el interior del mar, tales acontecimientos juegan un papel insignificante en la Luna. De acuerdo con nuestro conocimiento actual sobre la naturaleza de los volcanes, es al menos dudoso que podamos esperar verlos en la Luna. En cualquier caso, no existe forma de poder explicar la increíble abundancia de cráteres lunares con nuestra experiencia sobre los terrestres. La superficie de la Luna está cubierta hasta tal grado de cráteres, que parece dudoso poder encontrar un simple punto que no haya estado al menos una vez dentro de un cráter. Mientras que los volcanes de la Tierra cubren un área insignificante de la corteza terrestre, con el tamaño actual de los cráteres volcánicos sería extremadamente difícil o simplemente imposible para un astrónomo idetectar estos en la Luna incluso con el mayor de los telescopios! Quién sabe si los astrónomos de la Luna sabrían algo sobre la existencia de los volcanes terrestres. En la Luna, los cráteres representados por tamaños hasta las grandes dimensiones de los mares no son solo las formas superficiales más típicas y más comunes, son también, como se revela a primera vista, icasi las únicas!

No comprendo cómo se puede comparar la Luna con el globo terrestre para llegar a una conclusión diferente: las formas son completamente

²⁶ A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 2^a ed., Die Wissenschaft 66, Brunswick, 1920.

distintas, por lo que los orígenes también deberían serlo²⁷. La contradicción es tan manifiesta que probablemente la próxima generación se mofará de nuestra obstinación por intentar establecer una comparación.

ANTECEDENTES DE LA HIPÓTESIS DEL IMPACTO

Existe una amplia bibliografía aunque menos sistemática sobre la hipótesis del impacto.

Fue expuesta en 1828 por el astrónomo muniqués Gruithuisen²⁸. Sin embargo, en los escritos de este autor existen otras explicaciones fantasiosas.

Althans, miembro del Alto Consejo de Minas, observó que los proyectiles de artillería crean agujeros crateriformes en armaduras y concluyó que la corteza de la Luna se podían producir cráteres de impacto similares una vez que se hubo consolidado²⁹. Se dice que llegó a producir en 1840 un cráter de impacto artificial con un pico central mediante el impacto de metralla sobre un tipo de escayola compuesta por cal saturada, cemento y yeso³⁰. A Althans le pareció que la formación del pico central había sido causada por la onda de rebote, idea que se encuentra en los trabajos de partidarios posteriores de la hipótesis de impacto, pero ha sido rechazada por este autor sobre la base de sus experimentos que se van a analizar. En 1839, Althans publicó un estudio en el que intentaba explicar el origen de las montañas anulares terrestres, como las de Bohemia, mediante impactos³¹, una investi-

gación aceptada por algunos partidarios de dicha hipótesis.

En 1873, Proctor explicó los numerosos cráteres pequeños a través de impactos de cuerpos meteoríticos que golpearon sobre la superficie aún caliente y plástica de la Luna³².

El arquitecto Meydenbauer explicó la hipótesis del impacto en 1877 mediante un ensayo con dextrina en polvo, y produjo pequeños cráteres dispersando la punta de un cuchillo del mismo material. A veces estos pequeños cráteres también tenían picos centrales, pero Meydenbauer no expresó opinión alguna sobre su origen. Él pensaba que la superficie de la Luna estaba cubierta con material parecido a polvo o arena y los aglomerados del mismo material habían caído sobre ella. Creía que los mares son masas de azufre líquido y fósforo. En un ensayo posterior (1906) hizo la osada propuesta de utilizar la hipótesis del impacto para la geología terrestre³³. El experimento de Meydenbauer fue modificado posteriormente por Ahlsdorf³⁴, utilizando polvo de *Lycopodium*³⁵ con proyectiles de caucho o de lana que impactaron con diversos ángulos.

Al mismo tiempo que Meydenbauer, y como él sin conocimiento alguno de sus predecesores, el arquitecto August Thiersch apoyó la hipótesis del impacto en un artículo que escribió junto con su padre, Heinrich Thiersch, profesor de teología, primero en 1879 bajo el pseudónimo de "Asterios", y más tarde en 1883 con su propio nombre completo³⁶. Thiersch creía que incluso el Mare Imbrium se formó por impacto: "A través de un impacto por la caída de un cuerpo de grandes dimensiones, se creó una onda de inundación que rompió la corteza de la luna que alcanzó grandes distancias y arrojó los detritos hasta la periferia de la depresión". Sobre la naturaleza del cuerpo impactante escribió lo siguiente: "Como Saturno, la Tierra también pudo haber tenido un anillo de lunas a su alrededor; aunque a una escala más pequeña. A lo largo de eones, sólo la mayor de éstas, nuestra propia Luna, pudo haber atraído y asi-

27 [NT: Una vez más, para rechazar la hipótesis volcánica, Wegener expresa el principio del actualismo-uniformitarismo, en este caso bajo la forma de a iguales causas, iguales efectos, o, en otras palabras, el presente es la clave del pasado].

28 H. von P. Gruithuisen, *Analekten für Erd- u. Himmelskunde*, vol. 2, München, 1829 [NT: la referencia correcta de esta obra es vol. 1, N^o ii (1828)]. Sin embargo, en la *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* de Kant, que a veces se menciona en este contexto, apenas encuentro una reminiscencia de la hipótesis del impacto [NT: Las desigualdades orográficas de la Luna las explicaba el filósofo alemán en la obra citada mediante el colapso o hundimiento de la superficie lunar tras la penetración en su parte más externa de cuerpos que habían sido atraídos por la gravedad de nuestro satélite; véase Kant, I. (1755). *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*. H. Fischer, Erlangen (facsimile 1988), pp. 71-72; estas ideas apenas se podrían considerar, efectivamente como lo recalca Wegener, una reminiscencia de la hipótesis del impacto]. Véase también S. Günther, *Die Entstehung der Lehre von der meteoritischen Bildung des Erdkörpers*, Sitzungsber. d. Bayer. Akad. d. Wissensch., math.-phys. Kl., p. 21 y ss, 1908.

29 K. L. Althans, *Über Versuche, die eigentümliche Gestalt der Mondoberfläche zu erklären*, Gaea 24, 7 y ss, 87 y ss (citado en S. Günther).

30 Archenhold, *Zur Entstehung der Mondkrater*, *Das Weltall* 18, 166-171 (1918).

31 Althans, *Grundzüge zur gänzlichen Umgestaltung der bisherigen Geologie oder kurze Darstellung der Weltkör-*

per und Erdrindenbildung, 1839. [NT: cap. 8].

32 R. Proctor, *The Moon*, Londres, 1873. [NT: pp. 340-347].

33 A. Meydenbauer, *Über die Bildung der Mondoberfläche*, *Sirius* 10 (N.F. 5), 180 (1877) (contiene solo la descripción del experimento sin ilustraciones); *Die Gebilde der Mondoberfläche*, en el mismo sitio, 15 (N.F. 10), 59-64 (1882); Kant oder Laplace? *Kosmologische Studie*, *Marburgo* (Elwert) 1880; Kohle, Kali und Petroleum, *Himmel und Erde*, pp. 390-401 (1906) (contiene también láminas de su experimento).

34 H. Ahlsdorf, *Experimentelle Darstellungen von Gebilden der Mondoberfläche, mit besonderer Berücksichtigung der Details*, *Gaea* 1898, p. 35 y ss.

35 [NT: *Lycopodium* es un género de helechos cuyas esporas forman un polvo amarillento (llamado azufre vegetal por su carácter inflamable), utilizado en homeopatía].

36 Heinrich W. J. Thiersch y August Thiersch, *Die Physiologie des Mondes: Versuch einer Deutung derselben im Anschluss an die Arbeiten von Mädler, Nasmyth und Carpenter*, 42 pp., *Augsburgo* 1883.

milado aquéllas”³⁷. Igual que Gruithuisen, Althans y Meydenbauer, también Thiersch intentó explicar la formación de las montañas terrestres con la hipótesis del impacto.

En 1892, el geólogo Gilbert hizo una exposición de la hipótesis del impacto que vale la pena tener en cuenta. En este trabajo se considera la hipótesis volcánica cuidadosamente y es rechazada. Los procesos de fusión de los mares fueron producidos por la evolución del calor provocado por el impacto, y los surcos por las fuerzas radiales; los radios se vieron erróneamente como líquidos dispersos. Asimismo, la explicación del pico central por el rebote no es sostenible. Las grietas son interpretadas como resultado de la explosión de la corteza por grandes impactos próximos. Gilbert cree también que la Luna se formó a partir de un anillo de partículas individuales que en el pasado rodeaba la Tierra similar al anillo de Saturno. Si se consideran los meteoritos, los cráteres no tendrían una forma circular sino elíptica. Proporcionamos aquí el resultado de los cálculos de Woodward y los comparamos con las propias medidas de Gilbert sobre la elipticidad de 120 cráteres lunares³⁸.

E.H.L. Schwarz cree que la Tierra también fue intensamente bombardeada pero los lugares de impacto ya no son visibles. Llegó a esta idea de la observación aislada de una masa de lava (meláfiro amigdaloides) en Sudáfrica que está completamente rodeada de sedimentos, de tal forma que no parece existir fisura alguna o conducto que la alimente. A partir de aquí Schwarz concluye que el cuerpo meláfiro y otros similares se formaron por impactos desde el espacio en épocas geológicas anteriores. Esta suposición, en relación con el experimento de impacto que discutiremos más adelante, parece algo precaria³⁹.

N.S. Shaler en 1903 amplió las opiniones de Gilbert, y cree que debe producirse un desarrollo significativo del calor, los caracteres de la fusión que son reconocibles deben considerarse al menos como una consecuencia del impacto. En concreto la fusión de la parte interna de los mares puede explicarse así⁴⁰.

Casi al mismo tiempo, Romanes estableció el hecho de que tuvo lugar el calentamiento por impacto, arrojando balas sobre una placa de plomo mostró que la periferia de los impactos se enrojecía durante un breve tiempo. Este autor, así como otros

partidarios de esta hipótesis, llegó a la conclusión errónea de que la atmósfera protege a la Tierra, en oposición a la objeción de que si fuese cierta la hipótesis se formarían en la superficie terrestre caracteres similares. Pero esta protección es solo efectiva para cuerpos pequeños. Los objetos con el tamaño necesario para formar los cráteres en la Luna no serían detenidos significativamente por la atmósfera terrestre, como se puede ver con mayor facilidad si pensamos que la atmósfera forma solo una capa muy delgada sobre la Tierra. Dicho sea de paso, el cráter meteorítico de Arizona demuestra la inexactitud en la observación de Romanes. También considera los sistemas radiales como polvo, sin embargo, supone innecesariamente que deben ser cristalinos para explicar el elevado albedo⁴¹.

En 1907 H. Martus, el conocido autor de *Astronomische Geographie*, hizo una nueva exposición de la hipótesis del impacto⁴². Con un razonamiento similar al de Gilbert, establece que si los cráteres se han originado por impacto, no todos pueden ser circulares, aunque no se puede aceptar la suposición de que los diámetros de los cráteres lunares se corresponden al de los objetos que han caído. Examinó esta medida en numerosos cráteres según el mapa de la Luna de Neison⁴³, y llegó a la conclusión de que los cráteres lunares son circulares solo en la parte central de la Luna, y hacia los lados una forma oval con su eje mayor siempre en dirección al centro. Es obvio suponer que este resultado se deba a que en el mapa de Neison los cráteres no están dibujados con una perspectiva suficientemente reducida. Para los caracteres de la parte más externa, Martus admite el error en sí mismo, y por lo tanto los excluye de sus observaciones: “Están dibujados con una libración favorable. Cuando se trazaron en el mapa, los más occidentales y orientales no son los suficientemente pequeños para mostrar cómo se verían si estuvieran en el centro de la Luna, por lo que las longitudes en el mapa son significativamente

37 [NT: Las frases entrecomilladas se encuentran en la referencia de la nota 36, pp. 23 y 37, respectivamente].

38 G. K. Gilbert, *The Moon's Face; a study of the origin of its features*, Bulletin of the Phil. Soc. of Washington 12, 241–292 (1892–1894); véase también H. J. Klein, *Jahrb. d. Astron. u. Geophys.* 5, 33 y ss, Leipzig, 1894.

39 E. H. L. Schwarz, *The probability of large meteorites having fallen upon the Earth*, *Journ. of Geology* 17, 124 y ss (según S. Günther).

40 N. S. Shaler, *A comparison of the features of the Earth and the Moon*, *Smiths. Contributions to Knowledge* 34, No. 1438, *Washington* 1903 (según S. Günther). [NT: sobre los mares lunares, en concreto, véanse pp. 15–20].

41 Según una referencia en *Tägl. Rundschau* del 29 de diciembre de 1904. Lamentablemente no conozco el trabajo original. [NT: Se trata de un artículo de George Romanes sobre la formación de la Luna leído en la *Royal Society of Edinburgh* el 21 de noviembre de 1904, en el que defendía la hipótesis del bombardeo meteorítico sobre nuestro satélite, porque consideraba bastante improbable que sólo la acción volcánica hubiera dado lugar a algunas de las irregularidades de su superficie, entre ellas, los cráteres; véase Romanes, G. (1906). *A possible explanation of the formation of the Moon*. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 25(1), 471–479; una breve nota había aparecido previamente también en *Nature*, lxxi (December 8, 1904), 143].

42 H. Martus, *Die Gestalten der Ringgebirge des Mondes sind Zeichen seiner Entstehungsweise*, *Das Weltall* 8, 73 (1907/08); *Die Entstehungsweise der Monde der Planeten*, *Dresde* 1909 (revisado por C. Schoy en *Gaea* 45, 555 y ss). [NT: Martus (1909). *Entstehungsweise der Monde der Planeten*. C.A. Koch, *Dresde–Leipzig*, 52 pp.].

43 [NT: Se refiere a la obra publicada por Edmund N. Nevell (1849–1940), bajo el pseudónimo de Edmund Neison, sobre cartografía lunar; véase Neison, E. (1876). *The Moon and the condition and configuration of its surface*. *Longmans–Green*, Londres, 104 pp.].

te erróneas”⁴⁴. Creo que las explicaciones de Martus, de que el mismo error sistemático no se comete en el mapa de Neison, no son convincentes, puesto que proporciona una explicación mucho más simple de la que intenta dar Martus.

Martus sugiere, como Gilbert, que los sistemas radiales son un material que fue fundido y dispersado por el impacto, y fue cubierto por un material que posteriormente cristalizó, y sus superficies cristalinas reflejan ahora la luz solar, pero es poco probable porque el lapilli y los sistemas lávicos no muestran caras cristalinas, y, a diferencia de los sistemas radiales, tiene un albedo muy bajo.

En 1913, el vulcanólogo Johnston-Lavis llegó a la conclusión de que cuanto más exacta es la comparación de los volcanes terrestres con los cráteres lunares, más improbable se hace la hipótesis volcánica. Consideró que los sistemas radiales eran grietas (*cracks*)⁴⁵, pero en esto no podemos estar de acuerdo⁴⁶.

En modo alguno hemos agotado la bibliografía sobre la hipótesis del impacto con los trabajos mencionados⁴⁷. Sería difícil un resumen completo debido a la dispersión de la bibliografía y se requerirían estudios históricos más exhaustivos de lo que aquí se ha previsto.

EXPERIMENTOS PROPIOS SOBRE LA HIPÓTESIS DEL IMPACTO

A partir de la bibliografía anterior, es evidente la gran incertidumbre que hace más difícil comprender mejor el proceso de impacto, y que es fuente de muchos errores y opiniones encontradas. Ésta se debe a nuestra falta absoluta de experiencia con los procesos de impacto, con las operaciones y formas resultantes. Los escasos experimentos que hasta ahora se han hecho son poco sistemáticos y no pueden usarse en apoyo de la hipótesis. Para colaborar en esta situación, realicé una serie sistemática de experimentos sobre cráteres de impacto

44 [NT: Martus (1907/08), op. cit. (nota 42), p. 61].

45 [NT: Cracks es el término que utilizó Johnston-Lavis (véase la nota siguiente), para definir los sistemas radiales de la Luna, y que posee el mismo significado de grietas o hendiduras que Spalten, en alemán, empleado por Wegener].

46 H. J. Johnston-Lavis, *Systems of rays on the Moon's surface*, *Nature* 92, 631 (1913/14).

47 También See ha discutido esta hipótesis. Desafortunadamente, tampoco he podido conseguir una copia de su trabajo hasta ahora. [NT: Wegener se refiere al trabajo presentado por Thomas J. See (1866–1962), el 27 de noviembre de 1909 ante la *Astronomical Society of the Pacific*, en el que hacía algunas consideraciones a favor de la hipótesis del impacto; véase See, T.J.J. (1910). *The origin of the so-called craters on the Moon by the impact of satellites and the relations of these satellite indentations of the obliquities of the planets*. *Popular Astronomy*, 18, 137–144; un breve resumen apareció también ese mismo año: See, T.J.J. (1910). *The origin of lunar craters. A consideration of the impact theory*. *Scientific American Supplement*, 69(1786) (26 March 1910), 204–205].

en el Instituto de Física de Marburgo en el invierno de 1918/19⁴⁸, cuyos resultados pasaremos a discutir brevemente⁴⁹.

Como material utilicé cemento en polvo tanto para las superficies del impacto como para los objetos impactantes. La razón por la que usé polvo débilmente cohesionado se debió a que los impactos fueron creados de forma manual, por lo que la fuerza del objeto impactante se redujo considerablemente comparada con los procesos lunares. Si se quisieran obtener formas similares a pesar de esta pequeña fuerza, se debería disminuir también la fuerza molecular de la resistencia de la roca a la misma escala, lo que nos lleva a un bajo nivel de cohesión de este polvo. No se puede concluir de mis experimentos que la superficie de la Luna esté cubierta por un material pulverulento, pero el polvo en el experimento se corresponde con las rocas sólidas de la Luna que son similares a las de la Tierra. El cemento fue especialmente ventajoso en tanto que es posible endurecer los cráteres resultantes sin causar cambio alguno en las formas, dispersando cuidadosamente agua sobre la superficie que al día siguiente está saturada y endurecida. Para esparcir el polvo se utilizó siempre una cuchara sopera; la mayoría de los cráteres se formaron con media cucharada de polvo, el mayor, de 12 cm de diámetro, se creó con una cuchara colma. Si el blanco estaba rigurosamente presionado, no se formaron cráteres. Si estaba bastante suelto, se formaron depresiones crateriformes. Al principio, obtuve cráteres con una sola forma sin pico central, pero con el tiempo se obtuvieron en los experimentos buenos picos centrales, cuando el blanco estaba, por casualidad, en cajas de papel muy llanas, y por lo tanto el espesor era tan solo de $\frac{1}{2}$ a 1 cm. Esto condujo a la importante observación de que se formaba siempre un pico central cuando el espesor de la base no sobrepasaba $\frac{1}{10}$ del diámetro del cráter. Con este grosor, las piezas de cemento se rompían al endurecerse, quedaba bajo ellas una capa de cemento en polvo de unos cuantos centímetros de espesor y presionados por una pieza de papel, se comportaba como una superficie sólida. Por otra parte, se dispersó una capa suelta de $\frac{1}{2}$ cm de espesor. Con estos blancos se obtuvieron una serie de cráteres con pico central como se observa en las figuras 3 y 4, que a primera vista con muy similares a los cráteres lunares.

Para comprobar esta similitud también cuantitativamente, se midieron con sumo cuidado los perfiles de 18 cráteres que tienen pico central, dando las siguientes cifras en relación con el área circundante (véase la Tabla I), donde d representa el diámetro, w es la altura de la pared anular, la base del fondo del

48 [NT: Sobre estos experimentos elaboré dos breves informes que fueron publicados en Marburgo; véase Wegener, A.L. (1919). 1. *Über Luftwiderstand bei Meteoren*. 2. *Versuche zur Aufsturz-Theorie der Mondkrater*. *Sitzungsberichte der Gessellschaft der Gesamten Naturwissenschaften zu Marburg*, 2, 4–10].

49 A. Wegener, *Versuche zur Aufsturztheorie der Mondkrater*. *Nova Acta Abh. d. Leop.-Carol. Deutsch. Akad. d. Naturf.* 106, N^o 2, 107–117, Halle (1920); *Die Aufsturzhypothese der Mondkrater*, *Sirius* 53, 189–194 (1920).

Tabla I

	D	w	B	z	w-B=T	z-B=h	T/w	D/T	T/h
	41	4,5	-3,0	1,0	7,5	4,0	1,7	5,5	1,9
	50	4,0	-3,0	0,5	7,0	3,5	1,8	7,1	2,0
	52	2,0	-9,0	-6,8	11,0	2,2	5,5	4,7	5,0
	53	4,5	-3,5	-0,5	8,0	3,0	1,8	6,6	2,7
	53	5,8	-5,2	-2,7	11,0	2,5	1,9	4,8	4,4
	55	3,9	-8,9	-6,9	12,8	2,0*	3,3	4,3	6,4
	56	1,3*	-5,3	-2,3	6,6*	3,0	5,1	8,5	2,2
	58	4,0	-12,0	-9,5	16,0	2,5	4,0	3,6*	6,4
	58	7,0	-4,0	-1,0	11,0	3,0	1,6*	5,3	3,7
1. Promedio	53	4,1	6,0	3,1	10,1	2,9	3,0	5,6	3,9
	61	2,2	-6,3	-2,8	8,5	3,5	3,9	7,2	2,4
	62	3,5	-5,0	-3,0	8,5	2,0*	2,4	7,3	4,2
	65	3,0	-5,0	-0,5	8,0	4,5	2,7	8,1	1,8*
	68	3,6	-5,9	-1,9	9,5	4,0	2,6	7,2	2,4
	80	9,5	-6,0	-2,2	15,5	3,8	1,6*	5,2	4,1
	84	9,5	-9,5	-2,5	19,0	7,0	2,0	4,4	2,7
	97	5,8	-12,2*	-3,9	18,0	8,5	3,1	5,4	2,1
	98	6,0	-3,5	0,5	9,5	4,0	1,6*	10,3	2,4
	122	9,0	-9,5	-4,0	18,5	5,5	2,1	6,6	3,4
2. Promedio	82	5,8	-7,0	-2,2	12,8	4,8	2,4	6,9	2,8
Promedio general	67	5,0	-6,5	-2,7	11,4	3,8	2,7	6,2	3,3

cráter es b , y la altura del pico central es z (todas las cifras están en milímetros).

En la tabla se da la profundidad del cráter, $T = w - b$, la altura del pico central, $h = z - b$, así como la relación de la profundidad del cráter, L , respecto de la altura de la pared anular, T/w , del diámetro respecto de la profundidad del cráter, d/T , y de la profundidad del cráter respecto de la altura del pico central, T/h . Todo el conjunto se divide en dos grupos de acuerdo con el tamaño del cráter. En cada columna se representa en negrita el valor más grande, y el más pequeño está indicado por un asterisco.

Los valores promedio y los de un cráter concreto s (el mismo que se muestra en las figuras 3 y 4), están señalados en forma de perfil en la figura 1 de acuerdo con las experiencias.

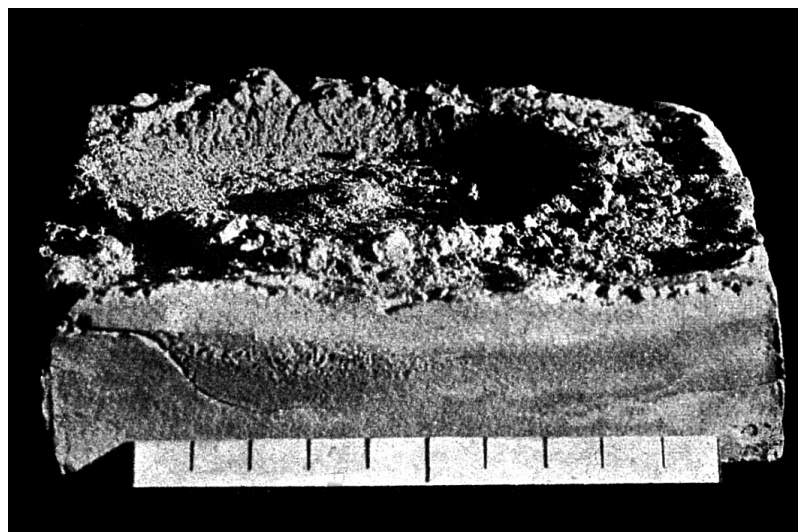
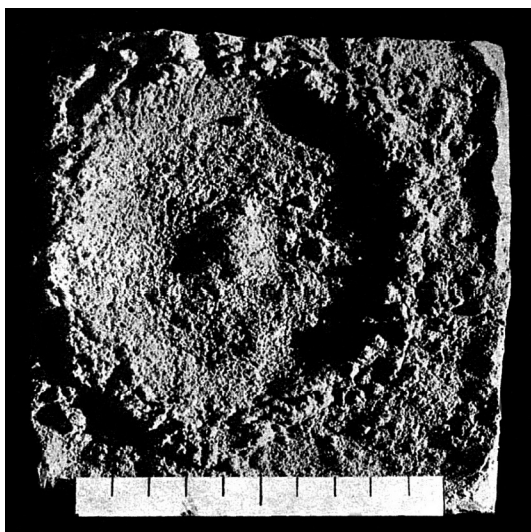
Podemos comparar estas cifras con las que recopiló H. Ebert para 92 cráteres lunares⁵⁰ (de los cua-

les 33 carecen de pico central, 40 con pico central sin medir, y 19 con los picos centrales medidos).

En nuestros ensayos, el valor promedio de la relación entre el diámetro y la profundidad del cráter, d/T , es 6,2, en el caso de los cráteres más pequeños que tienen un diámetro medio de 53 mm, es algo menor, en concreto 5,6, y en el caso de los mayores con un diámetro de 82 mm es un poco más grande, 6,9. El valor de 7 se sobrepasó siete veces, y el máximo fue 10,3. En el caso de los cráteres lunares, 7 es el valor más pequeño de esta relación, en nueve casos permanece por debajo de 10, el valor más común es 17. Mientras el valor el máximo alcanza los 70; estos grandes valores sólo se encontraron en mares de cráter o montañas anulares similares, donde la profundidad de los cráteres estaba considerablemente reducida por lavas de inundación. Por supuesto, estas formas con características de fusión no pueden compararse directamente con nuestros cráteres experimentales. Esta situación especial de los grandes cráteres lunares se caracteriza por la regularidad de Ebert, que reveló que la profundidad

Figs. 3 (izquierda) y 4 (derecha). Cráter de impacto sobre cemento en polvo (escala en centímetros)

⁵⁰ H. Ebert, *Über die Ringgebirge des Mondes*, Sitzungsber. d. Physik.-med. Soc. Erlangen 1890, pp. 171-191.



del cráter se ajusta por sí misma a una constante de 3,5 km que no depende del tamaño del cráter, y que se corresponde aparentemente con la diferencia de altura isostática entre la corteza sólida de la Luna y el (anterior) nivel de lava líquida, similar a las diferencias de nivel entre las áreas continentales y los fondos oceánicos de la Tierra. Nuestros experimentos coinciden satisfactoriamente con los cráteres lunares más pequeños, que no están rellenos de lava, y especialmente en la Luna, d/T aumenta con el tamaño de los cráteres⁵¹.

La coincidencia entre los demás valores es incluso mejor. Para la relación de la profundidad del cráter y la altura de las paredes, T/w , que siempre es menor que 1 en el caso de los volcanes terrestres, el resultado de nuestro experimento dio un valor de 2,7, mientras que Ebert proporciona un rango entre 2 y 3 para los cráteres lunares. Nuestros valores experimentales varían entre 1,6 y 5,5, en la Luna el rango está entre 1,1 y 4,4.

Además, la relación de la profundidad del cráter en nuestros experimentos respecto de la altura del pico central, T/h , es 3,3, es decir, el pico central se eleva solamente a una altura de un tercio de la profundidad del cráter. Para la Luna, Ebert encontró que esta relación era 2,9. Los valores individuales varían entre 1,8 y 6,4 en la Luna, y en los nuestros entre 1,5 y 9,4. En ambos casos, el pico central nunca alcanza la altura de las paredes anulares y sobrepasa el nivel del terreno circundante en 6 casos (de 19) en la Luna, y en 3 casos en nuestros experimentos (de 18), mientras que, como promedio, en ambos casos la cima del pico siempre se mantiene muy por debajo de este nivel. La afirmación de Ebert, “el pico central no queda por debajo del nivel medio de la superficie de la Luna, como se suponía en el pasado” (véase Schmidt, *Der Mond*, p. 60) también se puede aplicar a los cráteres experimentales.

Para apreciar correctamente estas coincidencias cuantitativas casi totales es importante tener en cuenta que los experimentos fueron realizados sin tener conocimiento alguno de los valores de Ebert, y que éstos se consideraron solamente después de que se obtuvieran los resultados finales. En estas circunstancias, los experimentos constituyen un fuerte apoyo para la opinión de que los cráteres lunares se formaron por impacto.

Se realizó una serie de experimentos especiales para conseguir una imagen clara del paradero final de las moles que caen y de la estructura del pico central. Con ese propósito utilicé yeso en polvo como objeto impactante porque contrasta fuertemente con el polvo de cemento gris del objetivo. En los cráteres resultantes, el yeso formó una capa fina compacta que cubrió todo el interior del cráter hasta el extremo de las montañas anulares, las paredes del anillo se formaron con el cemento que fue expulsado radialmente hacia afuera. El yeso en polvo cubrió solo la ladera interior del mismo, y

terminó en la fractura estructural que mostró que la pared anular era originalmente más alta cuando se formó por primera vez, pero la parte más alta se deslizó hacia el exterior. Esto está confirmado por la existencia de muchas partículas individuales de yeso que se encuentran junto a las partículas de cemento más grandes ahora lejos del cráter. Estas condiciones muestran que la masa extra de las montañas anulares es igual al déficit de la masa removida desde el cráter, un hecho que ya había sido determinado por Schröter de los cráteres lunares. La masa del impacto no juega un papel importante debido a su expansión como una fina lámina, y está casi compensada por el material que es expulsado. El excedente de materia resultante puede predominar sobre su deficiencia, y dependerá, entre otras cosas, de la velocidad de la caída. El argumento de Ebert, de que la mayor incidencia de dicha deficiencia de masa es una seria objeción en contra de la hipótesis del impacto, carece de fundamento. Éste encontró que existe un excedente de masa en 28 de los 92 cráteres lunares, y en 64 de ellos hay deficiencia. Yo pongo en duda que sea posible extraer una conclusión distinta que la de que tales excedentes o deficiencias puedan eliminarse mutuamente, como es de esperar en la hipótesis del impacto.

Los experimentos también pueden revelar algo sobre la construcción del pico central. Cuando se hizo un corte en unos cuantos cráteres experimentales con pico central se observó que la capa de yeso tenía el mismo espesor a lo largo de toda el área interna, y, en particular, en el pico central, era sólo un poco más gruesa. Éste estaba formado no solo del material impactante, sino también del cemento del blanco que estaba cubierto tan solo por una capa de yeso. Otros experimentos con una capa de estaño puesta entre la capa inferior fuertemente compactada y la delgada capa superior suelta mostraron que solamente la capa superior contribuía a la formación del pico central (véase la sección transversal en la figura 5). La capa de estaño siguió tal y como estaba bajo el pico central. En la parte más profunda del cráter en forma de anillo, la capa superior suelta desaparece y el yeso queda directamente sobre la capa de estaño. De aquí podemos hacernos una imagen clara de la formación del pico central: El objeto que cae verticalmente pierde su coherencia en el impacto; sus pequeños fragmentos obtienen una aceleración radial y ensanchan la depresión circular del cráter expulsando el material del blanco; el pico central de forma cónica se compone de esa parte del material suelto que no ganó aceleración radial, sino que, por su posición central, fue comprimido. Es fácil comprender por qué el pico central por lo general permanece por debajo del medio circundante; no se modeló, sino que se reformó. Por lo tanto, esto explica una importante característica de los cráteres lunares, que también se encuentra en nuestros experimentos.

Ahora se puede comprender la condición determinada experimentalmente para la formación del pico central, es decir, la existencia de una subcapa más sólida es alcanzada por la parte más profunda del cráter. Si está ausente desde el centro, entonces el centro del blanco puede expulsarse hacia abajo. La ausencia de pico central en estos cráteres, espe-

51 Ebert encontró 10 cráteres que tenían un diámetro inferior a 28 km, 20 en los que su diámetro variaba entre 28 y 90, 32 para los que estaban entre 90 y 120, y 40 cráteres superiores a 120 km de diámetro. [NT: Ebert (1890), op. cit. (nota 50)].

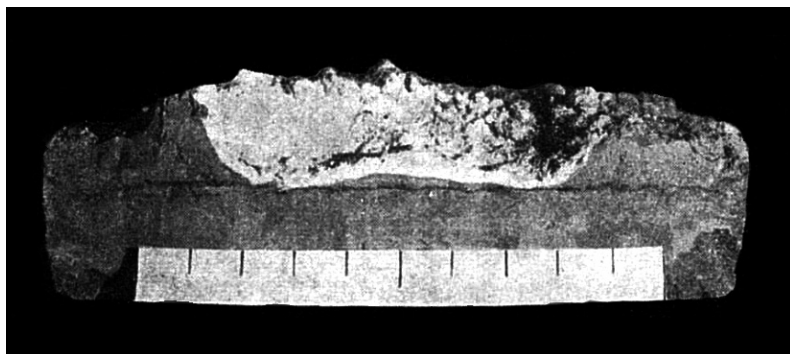


Fig. 5. Perfil natural de un cráter de cemento en polvo (el cuerpo impactante estaba hecho de yeso).

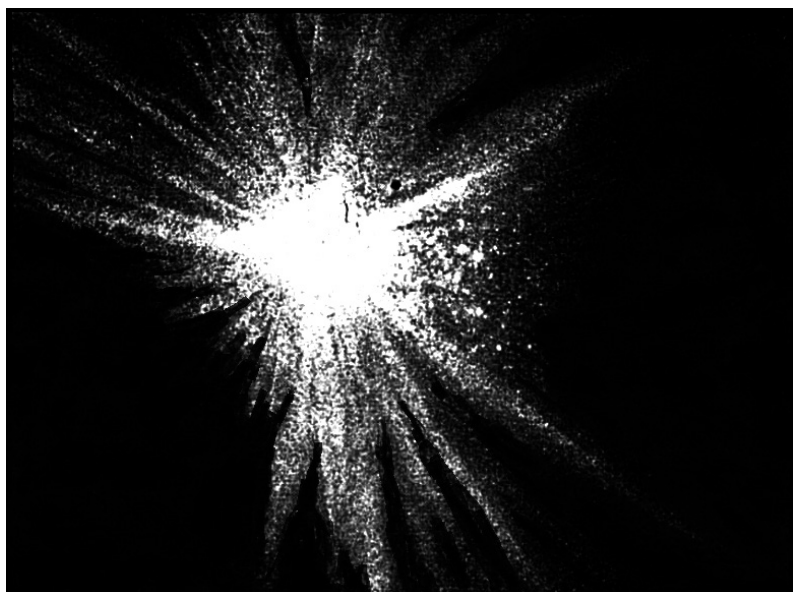


Fig. 6. Disposición bipolar y cadena central en un cráter de impacto

cialmente los que están en los mares, nos dice que allí no existió una subcapa más sólida en la Luna. Los cráteres que se formaron después del enfriamiento completo de la lava de los mares deberían mostrar picos centrales.

Los experimentos también produjeron otros caracteres que pueden considerarse como la confirma-

Fig. 7. Rayos de polvo por el impacto.



ción de la hipótesis del impacto. Algunas veces no se formó un simple pico central por la fragmentación del cuerpo impactante, sino una cadena central. En estos casos, la eyección del material en las cercanías del cráter fue más pronunciado en direcciones perpendiculares a la cadena central, por lo que toda la estructura adquirió una apariencia bipolar como se muestra en la figura 7.

La estructura concéntrica de la pared anular prevaleció en la dirección de la cadena central, perpendicular a la estructura radial del material eyectado. Uno de estos cráteres se muestra en la figura 6, lo que solo percibí al finalizar los experimentos. Sabemos que en el cráter lunar Copernicus se observa este mismo fenómeno, la cadena central está presente, con dirección radial norte-sur, y con predominancia concéntrica en la dirección este-oeste.

Se realizó otra serie de experimentos con pasta de cemento viscoso, donde se utilizó una vez más el mismo material tanto para el blanco como para el cuerpo impactante. Entre los cráteres resultantes, algunos tenían en apariencia un sorprendente parecido con el cráter lunar Archimedes. La pared anular era doble, como la de Archimedes, y el anillo interior estaba compuesto del material del cuerpo impactante, que cubría la parte interna con una lámina fina y terminaba en la forma de la pared del anillo interior. El anillo externo, sin embargo, se componía del material que había sido expulsado. No hubo eyección aquí. Estos experimentos parecen confirmar la conjetura ya evidente de que el cráter Archimedes se formó cuando la lava de Mare Imbrium no se había solidificado completamente. Además, los cráteres piriformes se obtuvieron siempre con el mismo material por impacto oblicuo, así como al dispersar los contenidos de una cuchara se produjeron hileras y repliegues de cráteres, que se parecían a las formaciones correspondientes de la superficie lunar.

Para imitar los rayos de polvo en los sistemas radiales, arrojé media cucharada de yeso en polvo sobre una pasta negra situada en el suelo. Los rayos del yeso, que por lo general alcanzaron una longitud de más de 2 m, se depositaron de una forma muy similar a los caracteres lunares como se muestra en la figura 7. Sin embargo, no se formó aquí ningún cráter, pero los demás experimentos ya habían mostrado que dicha eyección de material ocurre cuando se forman cráteres.

EL CRÁTER METEORÍTICO DE ARIZONA

Nuestra experiencia sobre los cráteres de impacto ha aumentado recientemente desde otra dirección, concretamente a través de un estudio profundo sobre una extraña estructura crateriforme, el llamado Coon Butte, en la parte septentrional del centro de Arizona. Desde la primera descripción detallada de A.E. Foote⁵² que apareció en 1891, la geología americana ha desarrollado una extensa biblio-

52 Am. Journ. of Sci., 1891, p. 413. [NT: Foote, A.E. (1891). A new locality for meteoritic iron with a preliminary notice of discovery of diamonds in the iron. American Journal of Science, 3rd ser., 42, 413-417].

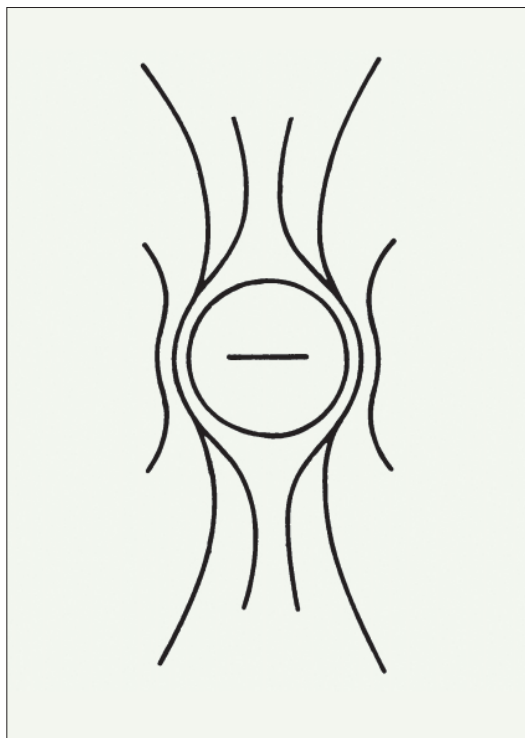


Fig. 8. Esquema de una estructura bipolar de un cráter de impacto con la formación de una cadena central.

grafía sobre el tema, y los hechos fueron expuestos detalladamente en particular por Barringer⁵³ y G.P. Merrill⁵⁴.

El diámetro del cráter es de 1150 m, la altura de las paredes entre 40 y 50 m sobre el terreno circundante, y la profundidad es de 170 m, por lo que el nivel interno del fondo está a 125 m bajo el nivel del terreno que lo rodea. En la figura 1 se da un perfil aproximado de este cráter. La ladera interior casi vertical de las porciones de la pared anular reveló que el terreno circundante se compone de arenisca roja de 50 m de espesor, un estrato de 80 m de grosor de caliza bajo la arenisca roja, y por debajo una capa de al menos 300 m de arenisca blanca, todas

53 D. M. Barringer, *Meteor Crater in Northern Central Arizona* (referencia Am. Journ. of Sci., 1910, p. 427). [NT: American Journal of Science, 4th series, 30(180), 427-429 (1910)].

54 Quarterly Issue of the Smithsonian Miscellaneous Contributions, vol. I, January 1908, p. 461-498. [NT: Merrill, G.P. (1908). *The Meteor crater of Canyon Diablo, Arizona; its history, origin, and associated meteoritic irons*. Smithsonian Miscellaneous Collections, 50(4), 461-498]. Véase también Am. Journ. of Sci. 1908, p. 265 [NT: Esta referencia -American Journal of Science, 4th series, 25(147), 265-266 (1908)- es una breve nota sobre el trabajo anterior]; 1911, p. 335 [NT: Barringer, D.M. (1911). *Physical notes on Meteor Crater, Arizona*. American Journal of Science, 4th series, 31(184), 335-336]; 1915, p. 482 [NT: Barringer, D.M. (1915). *Further notes on Meteor Crater, Arizona*. American Journal of Science, 4th series, 39(232), 482-483]. Una breve descripción en alemán con varias fotografías se reproduce en L. Waagen, *Unsere Erde, München o. J.*, p. 55 y ss. [NT: Bebbler, J. van, Kreichgauer, D. y Waagen, L. (sin fecha). *Unsere Erde. Allgemeine Verlags-Gesellschaft, München, 695 pp.*].

sin interrupción en posición horizontal. Sin embargo, en las paredes del cráter los estratos repuntan y presionan hacia afuera desde el centro hacia el exterior. Numerosos fragmentos fracturados de arenisca y caliza fueron expulsados hasta 6½ km de distancia, donde su tamaño generalmente disminuye conforme aumenta la distancia desde el cráter. Hasta una distancia de 1 km se encontraron bloques de 20-30 m de grosor. Entre el material eyectado, así como dentro del cráter, se encontró arenisca pulverizada. Esta "harina rocosa" constituye el 15-20% de este material. Incluso dentro del cráter hay trazas insignificantes de la fusión de la roca.

Los geólogos naturalmente dudan en explicar este cráter como un cráter de impacto más que volcánico. Pero resulta que a lo largo y a lo ancho no se ha encontrado rastro alguno de rocas volcánicas, y que tampoco se encontraron en las perforaciones dentro del cráter, y que solo se observaron capas horizontales de arenisca en la zona del aplastamiento. Por otro lado, desde 1866, se ha descubierto abundante hierro meteorítico dentro del cráter y en el área circundante. Uno de estos fragmentos pesa más de 500 kg. Además de piezas irregulares, que son las más comunes, se han encontrado también esferas⁵⁵ de hierro con cortezas de hasta 20 kg de peso, cuya estructura parece indicar que son gotas de hierro fundido similares al lapilli. También en la zona de detritos perforada se encontraron fragmentos de hierro meteorítico por debajo de los 200 m. La cantidad total de los fragmentos de hierro meteorítico recogidos alcanza aproximadamente los 15000 kg.

En estas circunstancias se abandonó el origen volcánico, y actualmente existe un acuerdo general de que se trata de un cráter de impacto que se formó por un gran meteorito de hierro o incluso un grupo de estos meteoritos. Se estima el diámetro del meteorito entre 150-200 m.

Debido a que se esperaba encontrar una mole de hierro económicamente explotable incluso mayor, se llevaron a cabo 28 perforaciones en la parte central del cráter. Una de éstas alcanzó los 300 m. El resultado ya se ha mencionado. Nunca se encontró la masa que se esperaba de hierro, y algunos autores expresaron la idea de que el impacto fue oblicuo y por lo tanto la masa de hierro debe encontrarse bajo la pared meridional del anillo, lo que parece altamente improbable, ya que nuestros experimentos muestran que el cuerpo impactante tiene tendencia a dispersarse superficialmente. Las observaciones magnéticas que se hicieron para este experimento no han dado evidencia alguna de la existencia de esta masa de hierro.

Está por determinar la época de formación del cráter, aunque la carencia de procesos erosivos

55 [NT: Se trata de las tectitas, vidrios cuya formación, como las moldavitas que se citan más adelante, está asociada a procesos de impacto meteorítico; resulta curioso que Wegener no utilizara este término que había sido acuñado en 1900, y se reconocía ya en esa época su origen extraterrestre, como sostiene también aquí Wegener; véase Suess, F.E. (1900). *Die Herkunft der Moldavite und verwandter Glaser*. Jahrbuch der kaiserlich-königlichen geologischen Reichsanstalt, 50(2), 193-381 (concretamente, p. 194)].

intensos sugiere que puede tener poco más de algunos miles de años. Tal y como se ha informado, existe una descripción legendaria del acontecimiento entre los indios de la zona.

La importancia de esto no puede ser sobreestimada fácilmente como un fenómeno natural independiente para el problema de los cráteres lunares. La facilidad con que el meteorito impactante venció las fuerzas moleculares de la caliza y la arenisca un poco menos compacta justifica nuestras consideraciones anteriores y la selección del material pulverulento para los experimentos. El hecho de que no se formara un pico central en ese caso está de acuerdo con nuestros resultados experimentales; porque la caliza más sólida se rompió uniformemente, pero está cubierta por la arenisca suelta. Se carecía de la superficie sólida necesaria para la formación del pico central.

Es en sí mismo altamente improbable que éste sea el único cráter meteorítico de la Tierra. Es decir, la abundancia de algunos vidrios volcánicos como las moldavitas en ciertas formaciones terciarias de Bohemia y Moravia, australita en Australia y otros similares, parece sugerir que han tenido lugar otros impactos de grandes meteoritos repetidamente, al menos en el pasado geológico. Es muy inseguro que la geología pudiera encontrar otros cráteres de impacto, probablemente borrados por la erosión. Las trascendentales suposiciones realizadas en esta dirección por algunos partidarios de la hipótesis del impacto parecen sin embargo prematuras a la luz de nuestros conocimientos actuales sobre la formación de las montañas. Pero sobre la base de los hechos, podemos decir que tales impactos han jugado un papel incomparablemente menor que en la Luna, donde aparecen prácticamente como el único factor en la formación de las montañas.

RESUMEN

De todo lo anterior llegamos a la conclusión a partir de un método puramente morfológico-empírico de que los típicos cráteres lunares pueden interpretarse mejor como cráteres de impacto. Examinemos ahora la cuestión sobre cuál es la naturaleza de los objetos impactantes y por qué nuestra Tierra posee tan pocas huellas de ellos. Consecuentemente, hemos de hacer un mejor resumen de la hipótesis del impacto.

Según las medidas de Landerer⁵⁶, el ángulo de polarización de las superficies oscuras del mar es $33^{\circ} 17' \pm 7''$, y esto se aproxima bastante a los vidrios volcánicos, obsidiana ($33^{\circ} 46'$) y vitrófiro ($33^{\circ} 18'$), y también coincide con la moldavita meteorítica ($33^{\circ} 42'$). Podemos concluir a partir de esto que la superficie de la Luna se compone esencialmente de vidrio volcánico oscuro, en el que los rayos luminosos pueden penetrar hasta una profundidad pequeña. Los lugares con mayor albedo son explicados por

la pulverización, o bien las partículas de los escombros se dispersan libremente, o han sido solidificadas como rocas sedimentarias detríticas. Se sabe cuánto aumenta el albedo de una roca vítrea cuando el material se fragmenta o se pulveriza. H. Ebert realizó un experimento⁵⁷ con un bloque vítreo que iluminó desde diferentes ángulos sobre suya superficie extendió parcialmente vidrio en polvo, en el que comprobó el resultado, ya conocido en la Luna, que cuando la luz incide verticalmente las diferencias del albedo son extremadamente altas, y van disminuyendo conforme el ángulo se hace más oblicuo. Los sistemas radiales parecen ser del material pulverulento que se dispersó sobre la superficie lunar. Puesto que el movimiento de estos rayos de polvo se adquiere por la caída y el avance radial, tienden a acumularse sustancialmente en la zona frontal de un obstáculo y solo ligeramente en el otro lado. Esto se puede reconocer claramente en el gran rayo que sale del cráter Tycho y cruza el Mare Serenitatis. Antes de entrar en su superficie tiene que cruzar la cadena montañosa de Haemus y aquí se puede ver realmente un considerable engrosamiento del rayo, mientras que en el lado norte del cráter Menelaus, primero está completamente ausente y reaparece a poca distancia de Haemus en la superficie oscura del mar. Para la increíble longitud del rango de estos rayos de polvo deberíamos tomar en consideración la superficie fuertemente curvada de la Luna, mientras que, por otro lado, las tangentes ganan altitud con gran rapidez en cualquier punto de la Luna, cuya gravedad es tan solo $1/6$ de la terrestre.

Los cráteres con superficies interiores oscuras, especialmente los mares crateriformes y los mares que están rodeados por paredes, muestran que en estos lugares la corteza sólida está fracturada y el interior de los cráteres está relleno de lava que se enfrió más tarde. En las mayores de esta clase de estructuras, la profundidad de los cráteres es constante, que según encontró Ebert es de 3,5 km. Las "vetas" parecen ser los límites de los nuevos flujos de lava. Los mares sin paredes son inundaciones de lava, aunque es probable su conexión con los impactos, no es reconocible de forma inmediata. De todos modos, la lava cubrió aquí en parte una corteza sólida ya existente de otros impactos, como parecen sugerir los cráteres "hundidos", descubiertos por Loewy y Puiseux. El Sinus Iridum se formó por un impacto cuando la superficie del Mare Imbrium estaba todavía líquida; en el momento de la formación de Archimedes aún estaba tan viscosa que no tuvo lugar la pulverización; cuando se formó Aristillus estaba totalmente sólida, sin embargo, para la formación de un pico central se expulsaron rayos de polvo. La ausencia de paredes orientales en el Mare Imbrium puede explicarse bien por impacto oblicuo o, por analogía con el Sinus Iridum, por un exceso de masas líquidas. En el noroeste de este mar, como ya reconoció E. Suess, se rompió buena parte de la pared anular con el terreno exterior adjunto, quedó suelta y se deslizó perceptiblemente hacia el centro

56 J. J. Landerer, *Sur l'angle de polarisation de la lune*, *Compt. Rend.* 109, 360-362 (1889), II; *Sur l'angle de polarisation des roches ignées et sur les premières déductions sélénologiques qui s'y rapportent*, *ibid.* 111, 210-212 (1890), II.

57 H. Ebert, *Beitrag zur Physik der Mondoberfläche*, *Sitzungsber. d. Bayer. Akad. d. Wissensch., math.-phys. Kl.*, 38, 150-180 (1908). [NT: concretamente pp. 151-156].

del mar. Es posible referirse a esta fusión como procesos volcánicos, justificando el origen de los cráteres lunares en relación con la hipótesis volcánica o de impacto; pero no deberíamos olvidar que las altas temperaturas, como se explicará más adelante, son generadas con mayor probabilidad por el propio impacto.

En las zonas polares de los mares no se observa huella alguna de fusión. Aquí las rocas se han fracturado continuamente por nuevos impactos de tamaño moderado y pueden tener una estructura sedimentaria. El albedo es muy alto (véase la figura 9). Tenemos que suponer una distribución zonal del calor también en la Luna, las temperaturas más elevadas se daban en la antigua zona ecuatorial de los mares (con una inclinación actual de 21° en relación con el ecuador lunar), y las más bajas en los polos correspondientes. La radiación solar, que solo rige la distribución del calor hoy en la Tierra, podía haber mantenido probablemente esa distribución del calor en la Luna. Los enormes impactos de Mare Crisium, Mare Serenitatis, y Mare Imbrium, parecen sugerir que la gran cantidad del calor en esa región de la Luna fue producida principalmente por impacto.

Los cráteres piriformes, como Censorinus, al norte de Theophilus, son explicados en esta hipótesis por impactos oblicuos, los repliegues por colisiones tangenciales, las hileras de cráteres se forman por la caída de un grupo de cuerpos discretos que dieron lugar a una secuencia en cadena por la atracción gravitacional de la Luna. Lo mismo se aplica también a los cráteres dobles. En un trabajo anterior⁵⁸ subrayé el alineamiento NE-SW de hileras de cráteres y repliegues entre Tycho y Mare Tranquilitatis, que puede explicarse por el impacto de un grupo muy distribuido de pequeños cuerpos, y no como sugiere Gilbert por el material expulsado al formarse el Mare Imbrium⁵⁹. No hay razón alguna para descartar la presencia de volcanes en la Luna. Pero hasta ahora no se han encontrado evidencias de su existencia. Se puede suponer que son relativamente raros y más pequeños que los volcanes terrestres. Las hendiduras lunares son fracturas en la corteza sólida de la Luna, y son comparables a las fosas de la Tierra, mientras que éstas últimas raramente permanecen intactas, lo que sucede como regla en la Luna. Se duda si se originaron por el incremento en volumen causado por el impacto o a través de un enfriamiento rápido debido a la radiación.

Llegamos ahora a la cuestión de cuál puede ser la naturaleza de los cuerpos impactantes. La respuesta debería darnos información sobre ésta otra, por qué la Tierra tiene un número de huellas de impacto incomparablemente menor.

Debemos tener claro que con estas preguntas sobrepasamos los límites más estrechos de la hi-

58 A. Wegener, *Versuche zur Aufsturztheorie der Mondkrater*, Nova Acta. Abhandl. d. Leop.-Carol. Deutsch. Akad. d. Naturf. 106, No. 2, p. 111, Anmerkung, Halle, 1920.

59 Según Gilbert (en el lugar citado) [NT: véase nota 38], el Mare Imbrium está rodeado de una estructura de repliegues radiales que cubren la mitad del disco lunar. Las partes del mismo ya han sido descritas por Beer y Mädler, y también por Neison.

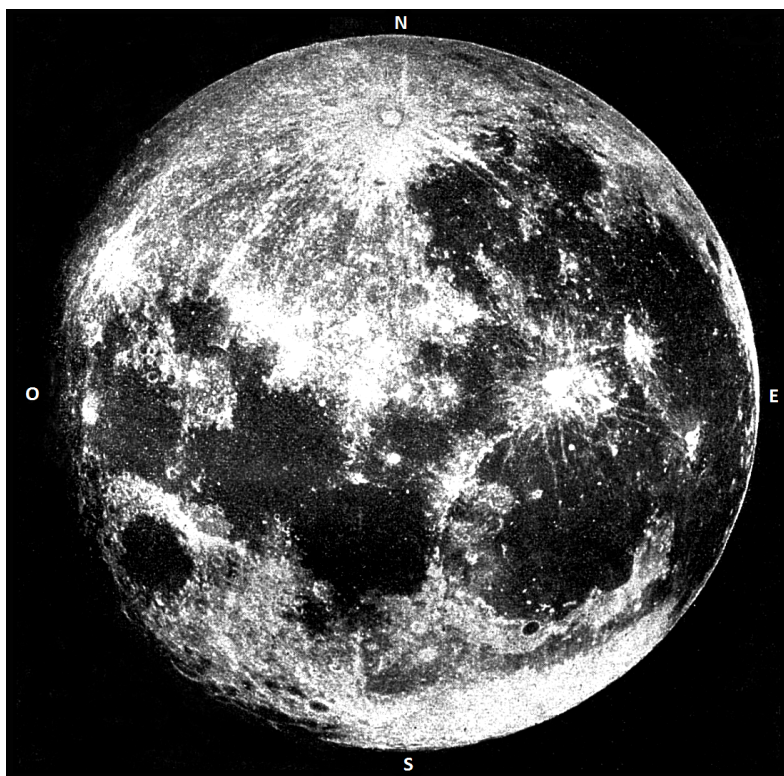


Fig. 9. Zona de los mares en luna llena.

pótesis del impacto. Se podría justificar este punto de vista y aceptaríamos incluso esta hipótesis por razones puramente morfológicas, aunque no pudiésemos decir nada sobre la naturaleza de los cuerpos impactantes actualmente. Y, en cualquier caso, se podría destacar incluso que, si la especulación sobre la naturaleza de los cuerpos impactantes resultara ser inadecuada, eso afectaría solo ligeramente a la probabilidad de la validez de la hipótesis. Porque la evidencia no es especulativa, sino que está basada en la morfología empírica.

La superficie de la Luna nos proporciona incluso algunas claves sobre la naturaleza de estos cuerpos impactantes, que no podemos dejar pasar.

La figura 9 ilustra la restricción de los mayores caracteres de impacto presumiblemente en la zona del antiguo ecuador de los mares, y parece sugerir que la trayectoria de los cuerpos impactantes no está dispuesta al azar, sino que forma parte de un nivel principal. Existen razones para suponer que dicho nivel coincidiera con la eclíptica y, por lo tanto, los cuerpos impactantes perteneciesen a nuestro sistema solar. De esta forma, la hipótesis meteorítica queda invalidada porque según nuestros conocimientos actuales los meteoritos poseen trayectorias hiperbólicas, por lo que no son parte de nuestro sistema solar, sino que parecen pertenecer más bien a una corriente estelar determinada. Esto nos conduce a una importante conclusión para el proceso del impacto, podemos asumir que los objetos impactantes no podrían tener velocidades superiores a unos cuantos kilómetros por segundo, porque las trayectorias de estos cuerpos no poseían una excentricidad demasiado alta. Esta velocidad relativamente baja proporciona la explicación para la forma de cráter, como ya señaló Gilbert. Cuanto menor es la velocidad, mayor es el efecto de la aceleración causado por la atracción de la Luna, y, en consecuencia, el ángulo de impacto se

aproxima más a la vertical. Obtenemos así una explicación de la prevalencia de la simetría en la forma circular de los cráteres lunares.

Por otro lado, es evidente que en la zona de los grandes impactos el calor era más elevado, y que, con el tiempo, durante la formación del cráter, se pierde por radiación hacia el espacio. Estas observaciones se aproximan más a los supuestos de Gilbert de que el calor evolucionó durante el impacto, en consecuencia, antes de la formación de los cráteres actuales hubo una lluvia más densa de caídas, probablemente de mayor tamaño, y este impacto casi continuo dio lugar a un ascenso de temperatura en la Luna, que rápidamente disminuyó en la época de construcción de nuevos cráteres lunares. Lo que observamos en la Luna es el declive de un proceso en épocas anteriores mucho más intenso y rápido. Las huellas de los últimos impactos son tan grandes que deberíamos suponer que se ha producido un aumento perceptible de la masa de la Luna. Por lo tanto, estamos obligados a concluir que la propia Luna fue construida a través del mismo proceso, la acreción de un gran número de cuerpos sólidos discretos cuyas trayectorias giraban en torno al Sol y se aproximaban entre sí⁶⁰. Este proceso de acreción debió ser naturalmente lento al principio, y más tarde alcanzó su punto culminante debido a que la masa de la Luna y, por lo tanto, su atracción gravitacional creció y atrajo los cuerpos con mayor rapidez, y posteriormente se consumieron todos los grandes objetos y disminuyó lentamente el proceso. Durante su culminación, los impactos fueron tan rápidos que el calor generado no fue al mismo ritmo que la cantidad irradiada hacia el espacio, y la temperatura del cuerpo lunar se elevó –al menos en toda la zona principal de los impactos sino en todas partes– sobrepasando el punto de fusión de las rocas.

⁶⁰ También la actual órbita de la Luna puede considerarse que es alrededor del Sol. Nunca es convexa a éste.

Al menos en la última fase del proceso, la radiación prevaleció una vez más y ya estaban solidificados los mares cuando se produjeron nuevos impactos.

Podemos suponer a partir de los hechos de las experiencias que los cuerpos impactantes pertenecían al sistema solar, y que la Luna se formó por un proceso de acreción. No encuentro ningún otro punto de referencia para conclusiones distintas. Bien podría haber sido el caso de que la asociación de las partes pequeñas formara una especie de arillo alrededor de la Tierra, similar a los anillos de Saturno. En este caso, sería conveniente preguntar por qué la Tierra no está cubierta en la misma medida por caracteres de impacto. También podría ser que estas partículas fueran independientes y tuvieran sus propias trayectorias cerca de la Tierra alrededor del Sol. Luego puede pensarse que la Tierra se formó de la misma manera; el material de la Tierra y de la Luna constituía un anillo simple alrededor del Sol, similar al de los pequeños planetas, pero con una mayor densidad. En lugar de un planeta, se formaron dos como resultado de la acreción, el más pequeño fue capturado más tarde por el mayor. Se confirman las ideas de algunos astrónomos de que la Luna también fue capturada como las de los demás planetas. En el caso de la Tierra, mucho más grande y más protegida por una atmósfera, los impactos causaron temperaturas mucho más elevadas, de modo que el período de declive estuvo dentro de la fase líquida, por lo que los impactos no pudieron dejar huella alguna. Sería probablemente demasiado prematuro querer llegar a unas conclusiones por ahora sobre estos supuestos. Pero es importante que la ausencia de grandes cráteres de impacto en la Tierra no puede usarse de ninguna manera como argumento en contra de la hipótesis de impacto para los cráteres lunares. ■

Este artículo fue recibido el día 1 de octubre de 2016 y aceptado definitivamente para su publicación el 3 de febrero de 2017.